

奶牛个体识别方法及其应用研究进展

孙雨坤 王玉洁 霍鹏举 崔梓棋 张永根*

(东北农业大学 动物科学技术学院, 哈尔滨 150030)

摘要 为了解个体识别在奶牛生产中记录产奶量、监控采食活动、监测卧床行为、追踪活动轨迹以及其他生产项目中的研究现状,以“奶牛”、“个体识别”、“识别方法”和“生产应用”为关键词,对2008—2018年的文献进行检索,并根据识别过程的不同特点对三类识别方法,即人工机械识别、接触式电子识别和图像生物识别进行归纳和总结并对识别方法、现代化生产应用以及国内进展等3个方面进行归纳和总结。结果表明:1)生物识别技术相较于传统方法对奶牛个体的伤害较小,可以在很多方面克服环境的干扰。2)目前智能识别技术与奶牛行为活动监测相关联,可以全面掌握个体健康状况和生产性能。3)国内在计算机视觉方面取得了长足的进步,为个体的智能化识别打下了坚实基础。今后个体识别技术研究应该着重于提高对环境的适应性和系统的兼容性,为建立完整的自动化奶牛监测体系提供依据。

关键词 奶牛; 个体识别; 识别方法; 生产应用概况

中图分类号 S823

文章编号 1007-4333(2019)12-0062-09

文献标志码 A

Research progress on methods and application of dairy cow identification

SUN Yukun, WANG Yujie, HUO Pengju, CUI Ziqi, ZHANG Yonggen*

(College of Animal Science and Technology, Northeast Agriculture University, Harbin 150030, China)

Abstract To evaluate the development of individual identification of dairy cows during production in recording milk yield, monitoring feeding activity, monitoring bed behavior, tracking activity track and other production projects, the literature related to methods and application of dairy cow identification 2008 – 2018 are retrieved by using “dairy cow”, “individual recognition”, “identification method” and “production application” as keywords. The results show that: 1) Compared with traditional methods, biometrics identification could overcome environmental interference in many aspects to reduce harm to individual cows. 2) Currently, intelligent identification technology associated with the monitoring of cow behavior could comprehensively monitor individual health status and production performance. 3) China has made great progress in computer vision, which builds a solid foundation for intelligent identification of individuals. In the future, the research on individual identification technology should focus on improving the environmental adaptability and system compatibility to provide basis for the establishment of a complete automatic cow monitoring system.

Keywords dairy cow; individual recognition; identification method; production application

随着集约化牧场的不断增多,精准畜牧业逐渐成为牧场高效管理理念,大数据化管理系统可以为集约化牧场提供关键生产指数和早期预警^[1]。个体识别是实现牧场数字化和智能化管理的基础,高效的牧场管理需要准确掌握群体的动态信息,分析牧

场管理数据的前提是准确收集相关个体数据。传统牧场对奶牛个体识别的方式以人工观测为主,虽然仍适用于存栏数较小的牧场,但对于规模较大的牧场,就会产生工作效率较低、劳力强度过大的问题,不适合集约化牧场的需求^[2]。除人工观察之外,当

收稿日期: 2009-02-15

基金项目: 国家奶牛产业技术体系(CARS-36)

第一作者: 孙雨坤, 博士研究生, E-mail: sun_yukun@126.com

通讯作者: 张永根, 教授, 博士生导师, 主要从事反刍动物生产研究, E-mail: zhangyonggen@sina.com

前应用较多的个体识别方法是无线射频技术(Radio frequency identification, RFID),该技术主要通过电子耳标与固定式或移动式的信号收发器读取奶牛的个体编号,多应用于记录产奶信息及寻找奶牛等方面。2012 年来,随着成像技术和模型训练领域的不断发展,图像生物识别技术在农业生产中的应用也变得越来越广泛,该技术在奶牛生产中健康评估、发情监控、行为活动等得到应用。基于图像生物识别技术的在个体识别方面有着准确性高和成本低廉的特点。奶牛个体识别可为牧场记录采食信息、产奶量、行为活动等提供了相关数据支撑,并结合计算机系统进行管理优化与决策部署。

为了解奶牛个体识别在生产中的应用现状,本研究拟以“奶牛”、“个体识别”、“识别方法”和“生产应用”为关键词,对 2008—2018 年的研究论文进行检索,根据识别过程的不同特点对三类识别方法,即人工机械识别、接触式电子识别和图像生物识别进行归纳和总结,并简述了现代生产中智能化个体识别与其他生产因素的相互关联和管理应用,以期为我国智能化养殖提供参考依据。

1 个体识别方法

获取动物个体编号是许多管理系统的第一步,每种方法都有不同的适用场景。准确、高效的识别动物个体需要具备易于操作、时效性强、特征突出、以及无害处理等基本特点。在建立识别系统时需要考虑收集信息过程的可靠性、高效率 and 准确性,以防止个体信息的丢失与错录。根据其不同特点和管理目标,识别方法可以被分为三类,即:人工机械、接触

式电子识别和生物识别。

1.1 人工机械识别

该方法需要在动物身体做相应标记,再由饲养员根据不同生产需要寻找特定目标。一种标记方法是在动物身体做永久性标记,包括刻耳和烙印。刻耳需要剪去动物耳朵边缘部分,通过耳朵上下左右不同位置的缺口确定分组或编号(图 1(a));或者将编号纹于牛耳内侧^[3]。烙印法用电热铁将编号印在身体上,或冷冻法利用不同色素将号码植入奶牛侧面区域(图 1(b))。虽然永久标记法看似简单易行,但剪耳或热烙印都对奶牛产生巨大的伤害,尤其造成奶牛对饲养人员产生潜在的恐惧心理,不利于生产管理。此外,耳朵的延展性不强,可以标记的动物编号有限,所以并不适合大规模牧场^[4]。而冷冻烙印会随着动物年龄的增大或者毛色的改变,号码会还原成近似牛毛的颜色,难以辨认。

耳标(图 1(c))是一种较为常见的个体识别方法,不但安装方便而且价格低廉,而且能够减小对动物的伤害,易于养殖户辨认,识别错误率低^[5]。耳标的材质多为塑料或者金属,耳标表面可以标记为数字、条形码或者不同颜色,也可以内置电子识别芯片。但是在实际生产中经常存在耳标丢失、损坏的情况,Fosgate 等^[6]发现由于丢失情况时常发生,不适合长期使用耳标,因此在一个牧场里的水牛佩戴耳标 2 年后仍可识别的动物仅有 21%。另外,耳标的使用也会感染一些疾病,一项研究发现,耳标引起的奶山羊发病率为 3.3%,6.5%存在耳组织受损的情况。上述方法都需要人工识别奶牛编号,所以加大了劳动成本,在大规模牧场中显得费时费力。



图 1 常见人工机械识别个体方法^[3]

Fig. 1 Common individual recognition methods of artificial machines^[3]

1.2 接触式电子识别

射频识别技术通过无线电波识别或追踪目标,广泛应用在动物识别、门禁访问、停车服务、物联网

跟踪等领域,该方法主要硬件组成包括 RFID 标签、应答器以及管理主机或者服务器,根据使用和技术标准可以分为耳标式、注射式和胶囊式^[7]。在奶牛

场中,耳标形式的RFID标签作为信号源较为常见,操作频率可分为高频(13.56 MHz)和低频(125.0~134.5 kHz),高频(455 MHz,2.45 GHz,5.80 GHz)读取距离在20~100 m,而低频(124 kHz~960 MHz)提供的读取范围在0.3~3.0 m^[8]。最近的研究使用超宽带信号(Ultra-wide band,1GHz)识别奶牛,其畜舍内的识别准确性高于高频和超高频信号,Porto的试验中超宽带信号在0.110 m的距离识别率为100%,在0.515 m的识别准确率为98%^[9]。

相较于其他传统识别方式,RFID标签可以记录大量数据,根据每头动物的不同编号,可以追踪从出生到被屠宰的全部信息。RFID可以配合终端服务器追溯个体的牧场信息、疾病情况以及生产情况,大数据能够帮助牧场提高信息的可靠性和实用性。RFID的工作原理并不依靠视觉识别个体,与传统方式相比降低了0.1%~6.0%的识别错误率,从识别效率来看,理论上系统每秒可以读取1000次标签信息^[7,10]。然而RFID也存在一些安全隐患,RFID系统由标签、通信电路、应答机、网络、终端服务器组成,容易发生标签内容被篡改、系统内容显示错误或服务器受到网络安全攻击等情况^[11-12]。同时,整套系统的成本较高,市场中根据不同应用需求,售价在几万到十几万不等。另外,根据实际现场的反馈,RFID会受到不同电磁环境的影响,应用效果差别巨大。标签功率、铁制围栏、降温风扇、电路质量等因素都会影响应答器接收电磁波的效果,导致读取距离缩小进而影响数据信息的采集。

另一种电子识别方式是可穿戴式无线传感器技术,其中以奶牛佩戴项圈或腿环较为常见,在这些装

备中安装有传感器,通过无线网络传至终端服务器。这类传感器可以检测到动物行为变化:测定加速度、角速度、咀嚼声音或压力;测定舍内环境变化;测定温度、湿度或者气压等。对于个体识别来说,由于传感器需要为单独奶牛进行适配,所以个体与数据之间具有匹配的唯一性,因此其个体识别率为100%^[9,13]。

1.3 图像生物识别

生物识别需要提取动物个体行为或生理特征,根据个体特征的唯一性,结合计算机与光学、声学、生物传感器和生物统计学原理进行识别动物个体的面部、声音、指纹等。与其他传统方法相比,该技术的特点不需要为动物佩戴多余设备或标记识别信息^[14]。生物识别过程包括:读取标签,传入服务器,标签处理,标签分类,匹配和存储。生物识别技术提高了个体识别的安全性和自动化识别的准确性和稳定性,具有适用广泛(覆盖各行各业)、性能卓越(准确、高效和鲁棒性强)及错误率低的特点。目前主要的生物识别方式是利用图像信息技术对面部、鼻镜、和眼部等特征部位进行解析^[15-16]。

奶牛鼻镜纹路犹如人体指纹一般,个体之间具有特殊的纹理和突起,不会随着时间推移而发生重大改变,可以作为识别个体身份的有效特征。早期由于图像像素较低、数据不充分、模型匹配度差等原因,在30头动物中验证期其识别准确率只有66.6%^[17]。Noviyanto等^[18]采集了8头奶牛的120张鼻镜图像,提取奶牛鼻孔之间的鼻镜部分(图2),将图像分辨率调整至200×200 PPI,增强对比度后,准确度可以达到90%。

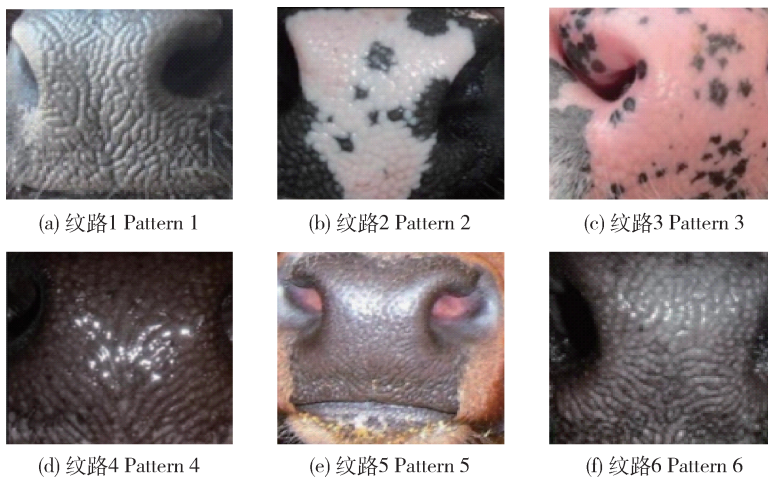


图2 奶牛鼻镜纹路^[18]

Fig. 2 Nasal mirror pattern of cows^[18]

奶牛眼部主要对虹膜和视网膜血管进行特征性识别,虹膜属于眼球中层结构,由于虹膜特征点较多,可以不受样本角度和尺寸变化的影响。Lu 等^[19]的试验中,60 张分辨率为 320×240 ppi 的虹膜图片实现了 98.33% 的识别准确率。视网膜存在于眼球内部,识别过程需要扫描眼底的血管图像,在视网膜的图像上可以看到两种类型的血管,其中毛细血管不仅特征不明显,还容易受到外界干扰(比如受到应激时眼部充血)^[20]。而视网膜上主要血管的特征比较明显,不易受到外界干扰,可以作为身份识别的特征。Allen 等^[21]采集了 869 头牛的视网膜样本进行个体识别,取双眼视网膜图像共 1 738 张,其识别准确率为 98.3%(图 3)。

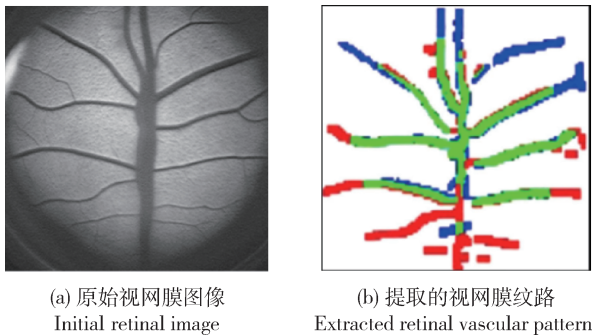


图 3 肉牛视网膜血管模式图^[21]

Fig. 3 Retinal vascular patterns of a beef animal^[21]

其他生物识别部位还包括奶牛面部、侧面花纹以及尻部。上述 2 种识别样本的采集较为困难,在遇到不配合的动物时会伤及饲养员。与鼻镜和眼部不同,奶牛花纹可以远距离通过视频图像获取数据样本。Cai 等^[22]收集了 30 头牛脸图像并建立了识别模型,结果显示局部二值模式加上 RASL 算法处理牛脸图像,其最高识别准确率可以达到 95.3%。Li 等^[23]在开发利用尻部特征识别奶牛个体时,运用了线性判断分析(Linear discriminant analysis)、二次判断分析(Quadratic discriminant analysis)、人工神经网络(Artificial neural network)和支持向量机(Support vector machines)4 种模型学习算法,其准确度最高的是二次判断分析(99.7%),精确度最高的是支持向量机(99.6%)。

2 识别管理应用

环境的变化会使某一识别系统的性能发生改变,不同的应用场景需要配置多种识别装置,在记录

个体生产性能和监测健康体况方面,记录个体信息将有利于追踪动物的全期生产状态,大数据分析会更加精准的了解奶牛个体的发情、疾病、生产性能等情况,对生产决策意义重大。

2.1 记录产奶量

产奶量是评估奶牛场经济效益的主要参考指标,奶量数据的准确性直接影响着管理者对牧场现状的评估和对未来规划的决策。在现代化大型牧场中,RFID 技术可以自动记录奶牛个体的产奶信息,在挤奶转盘或者单排挤奶设备入口处放置 RFID 应答器,配合奶牛电子耳标所记录的编号,与挤奶设备的程序相关联,按序记录每一头奶牛的产奶量,实现对牧场每日产奶信息的动态性记录。但是由于奶厅待挤区在奶牛拥堵的情况下需要降温,以缓解奶牛热应激,待挤区常安装有喷淋和风扇,并且有铁制栏杆围绕,因此 RFID 应答器安装在待挤区出口处(挤奶区入口)时,经常出现漏读或错读的现象。在小型牧场中,个体产奶量信息的记录较为传统,记录员在挤奶区以人工观察的方式识别个体后匹配其产奶量,工作量随着泌乳牛头数的增加而上升。Stankovski 等^[24]发现在小型牧场中,给奶牛佩戴超高频 RFID 耳标(915 MHz)识别个体,该系统的准确率达到到了 99.8%,以 12 h 为挤奶间隔周期计算,12 h \pm 5% 的奶牛比 12 h \pm 20% 的产奶量高 1.5%,因此降低奶牛待挤时间,提高挤奶效率可以增加产奶量。

2.2 监控采食活动

监测动物个体的采食行为十分重要,不仅关系到饲料消耗所带来的生产效益问题,还有利于发现奶牛的健康疾病。为了准确测算动物的采食量,已有研究选择用独立的空间计算单个动物的采食量^[25],但该方法不适用于实际生产中。也有研究低频 RFID(134.2 kHz)监测奶牛采食行为,在饲喂通道处安装多个应答器接收标签信号^[26]。Borchers 等^[27]应用 CowManager SensOor 系统(哈莫伦,荷兰)记录奶牛的采食时间,通过摄像机拍摄的方式识别个体,当单个动物靠近采食通道并伴有咀嚼动作时被认定为采食开始,在咀嚼停止时间维持 5 s 以上被视为采食停止。在其他图像信息技术对采食量的分析中,Shelley 等^[28]应用廉价的 3 维摄像头识别动物个体,同时测算了奶牛消耗饲料的重量和体积。但是,以上研究都是在动物群体数量较小的基础上进行的,在大规模生产中自动识别个体和监测

采食行为有待进一步研究。

2.3 监测卧床行为

卧床行为在现代化牧场中经常被量化为反映奶牛舒适度和健康状况的参考指标。奶牛卧床行为不但可以帮助奶牛获得充分休息,还能增加反刍时间,提高乳房洁净程度,降低乳房炎发病率。国内牧场一般出于成本因素,不会安排专人或利用相关设备负责观察奶牛卧床行为。Borchers等^[27]用视频回放的方式记录奶牛卧床行为,通过动物花纹特征识别个体,其试验设定当动物处于卧床上时,完成站立到趴卧的过程且侧面朝上时被认定为开始卧床行为,该方法根据平均卧床时间与个体卧床时间的差异预测奶牛的健康状况。Nielsen等^[29]对比了2种商业化奶牛观察系统,2种系统均使用可穿戴传感器识别奶牛个体,并通过无线网络发送行为信息: CowScout(GEA公司,德国)系统每十五分钟记录一次,传感器挂至左前腿处; IceTag(IceRobotics公司,英国)系统每秒测算一次动物行为,设备挂于奶牛左后腿处,为了保证系统记录的准确性,同时安装了录像机进行观察;通过视频回放发现,两种系统对奶牛卧床监测都具有较高的准确性(0.988%~0.999%)。

2.4 追踪活动轨迹

动物的活动变化往往预示着个体福利和健康问题,了解动物的行为活动可以促进大牧场精细化管理水平,维持个体奶牛健康,提高生产效益。实时监测动物位置是识别动物活动的基础,放牧条件下牧场可以使用全球定位系统(Global positioning systems, GPSs)进行个体目标的追踪。由于定位精度和牛舍结构的干扰, GPSs并不适用于室内定位,目前舍内主要通过穿戴式传感器和无线网络系统,或者视频录像的方式进行个体定位。Pastell等^[30]使用UWB(Ultra wide band)定位技术,利用奶牛项圈中的标签实时监测奶牛个体的位置信息,当动物移动超过0.05 m时系统会自动记录变化信息。该定位系统中集成了跳变滤波器、中值滤波器和扩展卡尔曼滤波器,与观测定位相比,奶牛运动的识别率达到100%。在确定奶牛位置后,牧场测算移动时间对生产的影响。Thompson等^[31]研究了2种算法,包括奶牛群体从离开牛舍到挤奶厅的时间及个体回到牛舍的时间,其研究结果显示出对群体测算的准确性($R^2=0.96$)明显高于个体活动的准确性($R^2=0.67$)。造成这一问题的原因可能是个体数

据样本不足。还有研究探讨了2种活动监测系统的性能,即奶牛行走和站立活动,监测过程包括:识别个体、获得活动类别数据、定位、开始时间和结束时间。虽然2种系统可以有效识别奶牛活动,但是不同系统对记录步数的一致相关系数较差(Concordance correlation coefficient, $\rho_c=0.593$),其原因可能是计步器置于动物位置的不同所带来的结果差异,比如绑定于前肢和后肢会在短距离行走过程中存在不同变化,也可能是不同计步算法影响了记录结果^[29]。

2.5 其他检测项目

追踪识别奶牛个体在其他方面的应用还包括发情追踪、疾病监控、体况评分、或者跛足评分等。穿戴式传感器和图像信息技术可以有效地监测出奶牛的爬跨行为,但是对于追踪并确定具体编号还有一定的技术障碍。目前,牧场还依靠人工涂鸭的方式标记疑似发情或病态的奶牛。有报道内置耳标传感器以收集每小时的温度变化,查看奶牛分娩前的状态表现^[32-33]。Rachel等^[34]利用超高频RFID系统监测了16头奶牛的个体刷毛行为的活动频次,认为目前RFID技术虽然可以识别靠近刷毛器的动物编号,但是对刷毛行为本身的监测准确度较低。图像生物识别被用于体况评分和跛足评分作,但是需要RFID作为识别个体的工具^[35-37]。Li等^[23]利用高清(1 920×1 080 ppi)摄像机记录奶牛尻部特征,通过不同花纹和轮廓的特点识别动物个体。因为与奶牛体况评分的观察部位相同,所以在未来应当考虑通过图像技术同时实现个体识别和体况评分2个功能。

3 国内奶牛识别系统的研究进展

何东健等^[45]认为未来精准畜牧业应该发展动物高级行为识别的理论和方法,形成一套完整的,可以自动判定个体健康状况的系统化养殖监管方案。国内奶牛个体识别技术在最近几年有了长足的进步,周文罕等^[46]提出了基于ZigBee无线网络技术的奶牛个体识别系统,在奶牛身上安装可编程的64位永久地址的定位节点,个体识别在20 m×20 m的空地中定位误差为2 m。郭卫等^[47]为解决多头奶牛进入射频区域后引起的冲突问题,比较了Aloha算法和二进制搜索算法,最终在RFID系统中采用了二进制搜索算法。另外,何金凤等^[48]在开发RFID奶牛识别系统时设计了基于高性能微控制

器 ATmega162 和专用读写芯片 RI-R6C-001A、工作频率为 13.56 MHz 的读写器,测试结果显示耳标读取距离为 0.86 m,连续读取出错率为 0%,写入出错率为 0.02%,每秒可防冲突读写 35 个耳标。图像信息技术在奶牛生产中的应用日趋成熟,可以有效帮助牧场管理者客观、有效地评价奶牛健康状

况和生产需要^[49]。赵凯旋等^[50]解析了奶牛图像信息,利用卷积神经网络识别奶牛个体的准确率为 93.33%。

目前生产中仍然以传感器或 RFID 技术作为主要的识别个体手段(表 1)。国外研究方向集中在多功能监测系统,电子项圈、可测温耳标等都有多用途

表 1 奶牛识别技术在生产试验中的应用

Table 1 Application of cow identification technology in production and test

项目 Item	识别方法 Identification method	识别位置 Body position	数量 Quantity	文献 Reference
挤奶 Milking	RFID	耳朵		[24]
	RFID	耳朵		[38]
采食行为 Feeding	耳号	耳朵	400	[39]
	传感器	脖子	14	[13]
	传感器	腿部	80	[27]
	RFID	耳朵		[28]
	传感器	腿部	180	[29]
	涂鸭	背部、侧面	20	[30]
卧床 Lying	耳号	耳朵		[25]
	传感器	腿部	80	[27]
	传感器	腿部	180	[29]
	涂鸭	背部、侧面	20	[31]
活动 Activitiei	项圈	脖子	14	[13]
	传感器	腿部	180	[29]
	耳号	耳朵	400	[39]
	传感器	脖子		[40]
体况评分 Body condition score	RFID	耳朵	186	[41]
跛足评分 Lame score	RFID、人工机械	耳朵、背部	208~242	[36]
	RFID	脖子	75	[42]
发情监测 Estrus monitoring	耳号	耳朵	400	[39]
	人工机械	背部	20	[32]
	传感器	腿部	5	[43]
反刍 Rumination	耳号	耳朵	400	[39]
	传感器	腿部	80	[27]
	传感器	脖子	1 121	[33]
	RFID	耳朵		[44]
刷毛 Grooming behavior	RFID	耳朵	16	[34]

的特点。具备开发替代人工方法的奶牛个体的识别系统无应激、自动化、准确率高的特点。但是,因为牧场环境的干扰,或是佩戴耳标造成的身体损伤,RFID技术的应用将会受到限制,所以图像信息技术应用是未来识别个体的发展方向。未来个体识别技术的开发应考虑不同环境变化对奶牛识别的影响,以及不同生产阶段奶牛体型变化。同时,为建立多功能系统,需要开发奶牛身体区域的细致化识别和适应多种环境下的模型算法,在技术上更加广泛地搜集特征数据并制定技术标准。

4 结论

传统识别方法对奶牛伤害较大,人员劳动强度大,并不适合未来规模化养殖的要求。RFID技术较为成熟,是目前替代人工应用较多的方法,但是存在兼容性差、适应性弱的问题。生物识别技术可以在很多方面克服环境的干扰,随着技术的发展对奶牛的监测功能也不断增加。未来需要改进现有硬件设备,提高准确性、兼容性,根据使用环境和生产特点开发自动化的奶牛个体识别系统,对促进我国畜牧业信息化水平具有深远意义。

参考文献 References

[1] Van Hertem T, Rooijackers L, Berckmans D, Peña Fernández A, Norton T, Berckmans D, Vranken E. Appropriate data visualisation is key to precision livestock farming acceptance [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017, 138(6): 1-10

[2] Neethirajan S, Tuteja S K, Huang S T, Kelton D. Recent advancement in biosensors technology for animal and livestock health management[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2017, 98(11), 398-407

[3] Awad A I. From classical methods to animal biometrics: A review on cattle identification and tracking[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016, 123(4): 423-435

[4] Leslie E, Marta Hernández-Jover, Newman R, Holyoake P. Assessment of acute pain experienced by piglets from ear tagging, ear notching and intraperitoneal injectable transponders [J]. *Applied Animal Behaviour Science*, 2010, 127(3-4): 86-95

[5] Barron U G, Butler F, McDonnell K, Ward S. The end of the identity crisis? Advances in biometric markers for animal identification. [J]. *Irish Veterinary Journal*, 2009, 62(3): 204-208

[6] Fosgate G T, Adesiyun A A, Hird D W. Ear-tag retention and identification methods for extensively managed water buffalo (*Bubalus bubalis*) in Trinidad [J]. *Preventive Veterinary Medicine*, 2006, 73(4): 287-96

[7] Ruiz-Garcia L, Lunadei L. The role of RFID in agriculture: Applications, limitations and challenges [J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2011, 79(1): 42-50

[8] Voulodimos A S, Patrikakis C Z, Sideridis A B, Vasileios A N, Eftychia M X. A complete farm management system based on animal identification using RFID technology[J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2010, 70(2): 380-388

[9] Arcidiacono C, Porto S M C, Mancino M, Giovanni C. A threshold-based algorithm for the development of inertial sensor-based systems to perform real-time cow step counting in free-stall barns[J]. *Biosystems Engineering*, 2017, 153(1): 99-109

[10] Stanford K, Stitt J, Kellar J A, McAllister T A. Traceability in cattle and small ruminants in Canada[J]. *Revue Scientifique Et Technique*, 20(2), 510-522

[11] Roberts C M. Radio frequency identification (RFID) [J]. *Computers and Security*, 2006, 25(1): 18-26

[12] Rotter P. A framework for assessing RFID system security and privacy risks[J]. *IEEE Pervasive Computing*, 2008, 7(2): 70-77

[13] Arcidiacono C, Porto S M C, Mancino M, Giovanni C. Development of a threshold-based classifier for real-time recognition of cow feeding and standing behavioural activities from accelerometer data [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017, 134(4): 124-134

[14] Jain A K, Nandakumar K. Biometric authentication: system security and user privacy[J]. *Computer*, 2012, 45(11): 87-92

[15] Unar J A, Seng W C, Abbasi A. A review of biometric technology along with trends and prospects [J]. *Pattern Recognition*, 2014, 47(8): 2673-2688

[16] Maltoni D, Cappelli R. Advances in fingerprint modeling [J]. *Image & Vision Computing*, 2009, 27(3): 258-268

[17] Minagawa H, Fujimura T, Ichiyangi M, Tanaka K. Identification of beef cattle by analyzing images of their muzzle patterns lifted on paper. [C]. In: *Proceedings of the Third Asian Conference for Information Technology in Agriculture*. Beijing: Asian agricultural information technology and management, 2002

[18] Noviyanto A, Arymurthy A M. Automatic cattle identification based on muzzle photo using speed-up robust features approach [C]. In: *Proceedings of the 3rd European Conference of Computer Science, ECCS'12*. Paris: WSEAS Press, 2012, 110-114

- [19] Lu Y, He X, Wen Y, Wang P S. A new cow identification system based on iris analysis and recognition[J]. *International Journal of Biometrics*, 2014, 6(1): 18-32
- [20] Jillela R R, Ross A. Segmenting iris images in the visible spectrum with applications in mobile biometrics[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2014, 57(5): 4-16
- [21] Allen A, Golden B, Taylor M, Patterson D, Henriksen D, Skucea R. Evaluation of retinal imaging technology for the biometric identification of bovine animals in Northern Ireland [J]. *Livestock Science*, 2008, 116(1): 42-52
- [22] Cai C, Li J. Cattle face recognition using local binary pattern descriptor[C]. In: 2013 *Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference*. Kaohsiung: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013(11): 1-4
- [23] LI W, JI Z, Wang L, Sun C H, Yang X T. Automatic individual identification of Holstein dairy cows using tailhead images[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017, 142(10): 622-631
- [24] Stankovski S, Ostojic G, SENK I, Marija R, Snezana T, Denis K. Dairy cow monitoring by RFID [J]. *Scientia Agricola*, 2012, 69(1): 75-80
- [25] 吴洪宇, 王晓帆, 张永根. 奶牛个体采食量测定仪的设计与试验 [J]. *饲料工业*, 2015, 36(19): 57-61
Wu H Y, Wang X F, Zhang Y G. Design and experiment on the test instrument for feed intake of individual dairy cows [J]. *Feed Industry*, 2015, 36(19): 57-61 (in Chinese)
- [26] Brownbrandl T M, Eigenberg R A. Development of a livestock feeding behavior monitoring system [J]. *Transactions of the Asabe*, 2011, 54(5): 1913-1920
- [27] Borchers M R, Chang Y M, Tsai I C, Wadsworth B A, Bewley J M. A validation of technologies monitoring dairy cow feeding, ruminating and lying behaviors [J]. *Journal of dairy science*, 2016, 99(9): 7458-7466
- [28] Shelley A N, Lau D L, Stone A E, Bewley J M. Short communication: Measuring feed volume and weight by machine vision [J]. *Journal of Dairy Science*, 2015, 99(1): 386-391
- [29] Nielsen P P, Fontana I, Sloth K H, Guarino M, Blokhuis H. Technical note: Validation and comparison of 2 commercially available activity loggers [J]. *Journal of Dairy Science*, 2018, 101(6): 1-5
- [30] Pastell M, Frondelius L, Järvinen M, Backman J. Filtering methods to improve the accuracy of indoor positioning data for dairy cows [J]. *Biosystems Engineering*, 2018, 169(1): 22-31
- [31] Thompson A J, Weary D M, Keyserlingk M A G V. Technical note: Mining data from on-farm electronic equipment to identify the time dairy cows spend away from the pen [J]. *Journal of Dairy Science*, 2017, 100(5): 1-8
- [32] Tsai D M, Huang C Y. A motion and image analysis method for automatic detection of estrus and mating behavior in cattle [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2014, 104(6): 25-31
- [33] Stangaferro M L, Wijma R, Caixeta L S, Abri M A, Giordano J O. Use of rumination and activity monitoring for the identification of dairy cows with health disorders: Part I. Metabolic and digestive disorders [J]. *Journal of Dairy Science*, 2016, 99(9): 7395-7410
- [34] Toaff-Rosenstein R L, Velez M, Tucker C B. Technical note: Use of an automated grooming brush by heifers and potential for radiofrequency identification-based measurements of this behavior [J]. *Journal of Dairy Science*, 2017, 100(10): 1-8
- [35] Jabbar K A, Hansen M F, Smith M L, Smith L N. Early and non-intrusive lameness detection in dairy cows using 3-dimensional video [J]. *Biosystems Engineering*, 2017, 153(1): 63-69
- [36] Schlageter-Tello A, Hertem T V, Bokkers E A M, Viazzi S, Bahr C, Lokhorst, K. Performance of human observers and an automatic 3-dimensional computer-vision-based locomotion scoring method to detect lameness and hoof lesions in dairy cows [J]. *Journal of Dairy Science*, 2018, 101(4): 1-14
- [37] Fischer A, Luginbühl T, Delattre L, Delouard J M, Faverdin P. Rear shape in 3 dimensions summarized by principal component analysis is a good predictor of body condition score in Holstein dairy cows [J]. *Journal of Dairy Science*, 2015, 98(7): 4465-4476
- [38] 吕伟国. 基于 EPC 物联网和 RFID 的奶牛精细养殖信息管理系统 [D]. 吉林大学, 2013
Lv W G. Information management system of precision cow-feeding based on the EPC of the internet of things and RFID [D]. Jilin University, 2013 (in Chinese)
- [39] Rutten C J, Kamphuis C, Hogeveen H, Huijps K, Nielen M, Steeneveld W. Sensor data on cow activity, rumination and ear temperature improve prediction of the start of calving in dairy cows [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017, 132(1): 108-118
- [40] Tullo E, Fontana I, Gottardo D, Sloth K H, Guarino M. Technical note: Validation of a commercial system for the continuous and automated monitoring of dairy cow activity [J]. *Journal of Dairy Science*, 2016, 99(9): 7489-7494
- [41] Halachmi I, Klopčič M, Polak P, Roberts D J, Bewley J M. Automatic assessment of dairy cattle body condition score using thermal imaging [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2013, 99(6): 35-40
- [42] Pluk A, Bahr C, Poursaberi A, Maertens W, Van Nuffel A, Berckmans D. Automatic measurement of touch and release

- angles of the fetlock joint for lameness detection in dairy cattle using vision techniques[J]. *Journal of Dairy Science*, 2012, 95(4): 1738-1748
- [43] 田富洋,王冉冉,刘莫尘,王震,李法德,王中华. 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(s1): 277-281
- Tian F Y, Wang R R, Liu M C, Li F D, Wang Z H. Oestrus detection and prediction in dairy cows based on neural networks [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(s1): 277-281 (in Chinese)
- [44] 张爽. 奶牛个体反刍行为监测技术研究[D]. 东北农业大学, 2017
- ZHANG S. Research on ruminant behavior monitoring technique of individual cow [D]. Northeast Agricultural University, 2017 (in Chinese)
- [45] 何东健,刘冬,赵凯旋. 精准畜牧业中动物信息智能感知与行为检测研究进展[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(5): 231-244
- He D J, Liu D, Zhao K X. Review of perceiving animal information and behavior in precision livestock farming [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(5): 231-244 (in Chinese)
- [46] 周文罕,汪小岳,丁为民. 基于 ZigBee 的奶牛个体信息识别及定位系统设计[J]. *江西农业学报*, 2010, 22(1): 116-118
- Zhou W H, Wang X C, Ding W M. Design on information identification and position system of individual cow based on ZigBee [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2010, 22(1): 116-118 (in Chinese)
- [47] 郭卫. 奶牛数字化管理关键技术的研究[D]. 河北农业大学, 2009
- Guo W. Research on key techniques in digital management of dairy cattle [D]. Agricultural University of Hebei, 2009. (in Chinese)
- [48] 何金凤,钱东平,张庆国,李建国,吕长飞,霍晓静. 奶牛精细饲喂系统中读写器的设计[J]. *农机化研究*, 2010, 32(3): 118-121
- He J F, Qian D P, Zhang Q G, Li J G, Lv C F, Huo X J. Design of the reader in cows' precision feeding system [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2010, 32(3): 118-121 (in Chinese)
- [49] 孙雨坤,岳奎忠,李文茜,么恩悦,刘鑫,李洋,张永根. 图像信息技术在奶牛生产中的应用[J]. *动物营养学报*, 2018, 31(5): 1626-1632
- Sun Y K, Yue K Z, Li W X, Yao E Y, Liu X, Li Y, Zhang Y G. The application of image information technology in dairy cow production [J]. *Chinese journal of Animal Nutrition*, 2018, 31(5): 1626-1632 (in Chinese)
- [49] 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 K X, He D J. Recognition of individual dairy cattle based on convolutional neural networks [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(5): 181-187 (in Chinese)

责任编辑: 杨爱东