

奶牛健康监测设备与技术研究及应用进展综述

刘云玲¹ 魏艳辉^{1,2} 徐小伟³ 陈克⁴

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学烟台研究院, 烟台 264670;
3. 中华人民共和国泉州海关, 泉州 362019; 4. 中国检验检疫科学研究院, 北京 100123)

摘要: 我国的奶牛养殖数量逐年增加,通过对奶牛的生理参数和行为进行监测,可以提高奶牛养殖的经济效益,提升我国奶业的竞争力。随着人工智能技术的发展,奶牛健康监测的设备和技术在不断更新和完善,为奶牛健康监测提供了便捷和精确的手段。本文综述了近年来奶牛健康监测方面的研究进展,从奶牛的生理参数监测和行为监测两方面展开,生理参数包括体温、体尺、体质量、呼吸频率等,行为包括基本行为(站立、行走、躺卧等)、反刍、跛行等。对国内外奶牛健康监测的设备和技术进行了系统的分析,总结了不同监测设备和技术的优缺点和适用情况,并结合当前已有的应用案例,对奶牛健康监测研究所面临的问题进行了讨论,指出了奶牛智慧养殖的发展趋势,旨在为奶牛健康管理和养殖业的可持续发展提供方法和思路的参考。

关键词: 奶牛; 健康监测; 生理参数监测; 行为监测; 智慧养殖

中图分类号: S-1; S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2023)S1-0303-12

Review of Research on Dairy Cow Health Monitoring Equipment, Technology and Application

LIU Yunling¹ WEI Yanhui^{1,2} XU Xiaowei³ CHEN Ke⁴

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Yantai Institute of China Agricultural University, Yantai 264670, China

3. Quanzhou Customs of the People's Republic of China, Quanzhou 362019, China

4. Chinese Academy of Inspection and Quarantine, Beijing 100123, China)

Abstract: The number of dairy cows in China has been steadily increasing over the years. Monitoring their physiological parameters and behavior is crucial to improve their production performance, economic benefits, and enhance the competitiveness of China's dairy industry. However, traditional monitoring methods, such as using thermometers to monitor physiological parameters, can lead to stress reactions in cows. Additionally, behavioral monitoring relies mainly on manual observation, which is prone to errors due to differences in experience and low efficiency. Fortunately, with the advancement of artificial intelligence technology, equipment and technology for cow health monitoring are constantly evolving. The methods provided convenient and accurate means for cow health monitoring, overcoming the limitations of traditional methods. The advantages of the methods included being non-contact, stress-free, and highly efficient. The research progress in equipment and technology for monitoring the health of dairy cows both domestically and internationally were systematically analyzed and summarized. Specifically, it discussed the monitoring of physiological parameters such as body temperature, body size, weight, and respiratory frequency, as well as behavioral monitoring, including basic behaviors (such as standing, walking, lying down), rumination, and limping. In terms of physiological parameter detection, three methods for monitoring cow body temperature were compared. Implantation and contact methods had advantages such as high stability and low cost, while non-contact methods had a wide range of temperature measurement and can be used for non-invasive temperature measurement. The methods were analyzed based on two-dimensional and three-dimensional images, as well as the combination of two-dimensional and three-

收稿日期: 2023-05-20 修回日期: 2023-08-30

基金项目: 国家精准农业应用项目(JZNY001)

作者简介: 刘云玲(1976—),女,副教授,主要从事农业人工智能和智能信息处理研究,E-mail: liuyunling@cau.edu.cn

通信作者: 陈克(1971—),男,研究员,主要从事信息技术在植物保护和动植物检验检疫领域的应用研究,E-mail: jwsgchh@qq.com

dimensional images, and concluded that the combination of two-dimensional and three-dimensional images can more accurately measure the size of cows. The relational model used in cow weight estimation was compared and analyzed, and the conclusion that multiple regression model can accurately estimate cow weight was drawn. The characteristics of sensors, cameras, infrared thermal imagers and other equipment used for monitoring cow respiration were analyzed, and their applicability was compared. In terms of cow behavior monitoring, the application principles, advantages and disadvantages of contact sensor monitoring and non-contact visual monitoring in cow behavior monitoring were summarized. Sensor monitoring had more advantages in monitoring accuracy, while visual monitoring had advantages such as high efficiency and non-invasive. In addition, typical health monitoring application systems in smart aquaculture both domestically and internationally were summarized and analyzed, and the characteristics and application scenarios of the application systems were introduced. Finally, in view of the problems faced by cow health monitoring methods, the need to further optimize data analysis and processing methods while improving equipment and technology was proposed, providing efficient tools that combine software and hardware for cow health monitoring, and providing sustainable development methods and reference ideas for cow health management and the breeding industry.

Key words: dairy cow; health monitoring; physiological parameter monitoring; behavior monitoring; smart farming

0 引言

近年来,我国畜牧业综合生产能力不断增强,奶牛养殖是现代畜牧业中最有潜力的产业之一^[1]。国家统计局数据显示,2021 年我国牛只饲养总量达到 9.8172×10^7 头,牛奶总量达到 3.6827×10^7 t,相较于 2010 年提升 21.18%^[2]。然而,奶牛健康的管理问题一直是畜牧业面临的重要挑战之一,不仅会影响奶牛的生产性能和经济效益,还可能对人类健康产生负面影响。实现对奶牛健康的有效监测和管理至关重要。

奶牛健康监测的主要内容包括生理参数监测和行为监测两方面。生理参数包括体温、体尺、体质量、呼吸频率等^[3],行为包括基本行为(站立、行走、躺卧等)、反刍、跛行等^[4]。通过对这两方面指标的监测,可以了解奶牛的身体状况和生产性能,及时发现和诊断疾病,并采取相应的措施进行管理和治疗^[5]。

随着科技的不断发展,奶牛健康监测的设备和 技术也不断更新和完善。无线传感器、激光扫描仪、

压力传感器、三维点云处理、图像和视频分析技术等新兴设备和技术,为奶牛健康监测提供了更加便捷和精确的手段。同时,新技术的应用范围也从传统的现场监测,到云端数据分析和远程监控等领域,为奶牛健康管理和养殖业的可持续发展提供了强有力的支持。

本文从奶牛生理参数监测和行为监测两方面展开论述,阐述相应设备和技术的研究和应用现状,探讨实现对奶牛健康的全面、精准监测和管理的技术路径,总结奶牛健康监测的研究成果,为奶牛的健康监测和生产提供支持。

1 奶牛生理参数监测

生理参数监测是奶牛健康监测的重要组成部分,能够直接反映奶牛的身体状况和生产性能。常规监测方法过程如图 1 所示:利用传感器获取奶牛的体温、呼吸等数据,也可用摄像机采集图像和视频数据,将采集到的数据经无线网络传输到后台服务器,应用统计分析、计算机视觉等技术对数据进行处理,从而实现奶牛体尺、体温、呼吸频率和体质量的

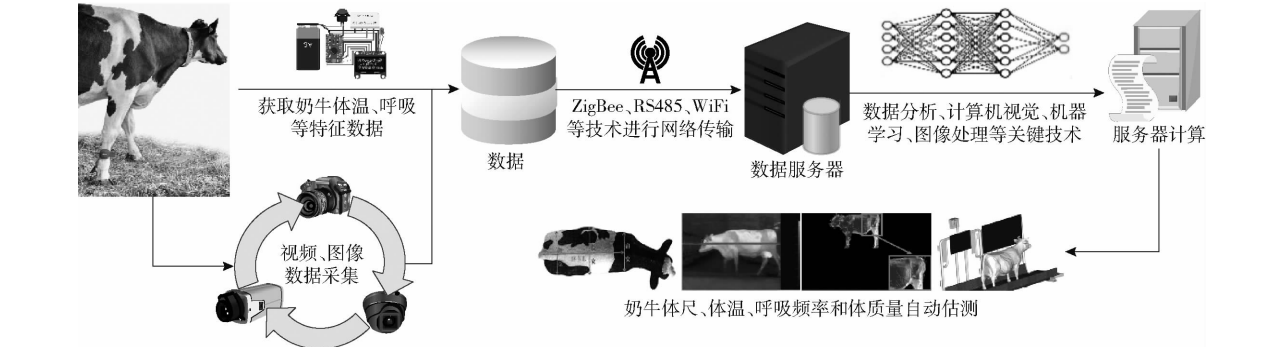


图 1 奶牛生理参数监测流程示意图

Fig. 1 Schematic of physiological parameter monitoring technology for dairy cows

自动估测。

1.1 体温监测

体温过高或过低均可能是奶牛某些疾病的表现,需要及时准确地检测奶牛体温的变化^[6]。奶牛体温监测的内容包括测量奶牛的体温以及监测体温的变化趋势。奶牛的正常体温为 38 ~ 39.3℃,以直肠温度为准^[7]。传统测量奶牛体温

的手段是兽医专用体温表^[8]。这种人工测温方法不易操作,奶牛易产生应激反应。随着科学技术的发展,传感器和红外热成像技术的应用,在一定程度上解决了上述问题。目前应用在奶牛体温自动监测方面的设备主要有植入式芯片、接触式温度传感器和非接触式红外测温仪,不同测温方式对比分析如表 1 所示。

表 1 不同奶牛体温测量方法对比
Tab.1 Comparison of different body temperature monitoring methods for dairy cows

设备	采用的技术	测量方式	优缺点
植入式芯片	将感温芯片植入动物体内测温	植入式	优点:准确性、稳定性高 缺点:易对奶牛造成不适
接触式温度传感器	用集成温度传感器的项圈、耳标等测温	接触式	优点:成本低、操作简单 缺点:固定困难、适应性差
非接触式红外测温仪	利用红外技术进行非接触式测温	非接触式	优点:测温范围广、无创测温 缺点:受环境影响大

植入式芯片是通过将感温芯片植入动物体内的方式来进行测温。IWASAKI 等^[9]将负温度系数 (NTC)热敏电阻与蓝牙模块进行封装后植入奶牛体内进行体温测量,通过蓝牙进行数据传输。CHUNG 等^[10]将 134.2 kHz 的射频识别 (Radio frequency identification,RFID)的 LifeChip 微芯片植入奶牛的耳朵基部,将 RFID 扫描仪穿戴在奶牛颈部,通过无线通信技术传输数据,可实现长时间的体温测量。植入式芯片可以 24 h 不间断地实时监测奶牛的体温,但这种监测设备所使用的低频率 RFID 感温芯片,通信距离较短,只适用于静止状态下的体温测量,且需要进行手术植入,易带来一定的伤害和风险。

接触式温度传感器是一种常见的奶牛体温监测设备,这种设备通常由传感器、数据采集器和数据传输系统等组成。DS18B20 型数字温度传感器具有单总线、体积小、分辨率高、抗干扰强等特点。刘忠超等^[11]、屈东东等^[12]、CHEN^[13]和 NOOTYASKOOL 等^[14]利用 DS18B20 型温度传感器分别对奶牛后腿腕部温度、耳道边沿温度、颈部温度进行测量,测试结果表明,在适当温度范围内精度能够达到 ±0.2℃。MLX90614 数字温度传感器温度测量范围为 -40 ~ 25℃,测量分辨率为 0.02℃,具有体积小、成本低、易集成等特点。文献[15 - 17]设计奶牛智能项圈,集成了 MLX90614 型温度传感器来测量奶牛颈部温度,基本满足体温测量时的精度要求。ANUSUYA 等^[18]将 TMP102 型传感器放置在奶牛耳道附近来测量奶牛耳温。LONG 等^[19]设计了一种基于 WiFi 的集成 TMP102 型温度传感器的智能耳标来测量奶牛耳温,并实现了体温和耳温差补偿算

法。TMP102 型传感器的测量精度为 ±0.5℃,分辨率为 0.062 5℃,可以进行长时间的温度测量。接触式温度传感器具有安装方便、价格低廉、对奶牛的身体伤害较小等优点,但由于传感器是对奶牛体表温度进行测量,选用奶牛的不同部位进行温度测量,并通过温差补偿推算奶牛体温,测量精度上易受到环境因素的影响,精度可能会有所下降,且需要与奶牛产生接触,对奶牛会有一定的影响。

红外温度传感器、红外测温仪、红外热像仪都是常见的非接触式奶牛体温监测设备,通过红外线技术实现对奶牛体表温度的远距离测量。由于不需要与奶牛产生直接接触,避免了对奶牛的影响和干扰。刘忠超等^[20]设计了一种基于 WiFi 和云端的奶牛体温监测系统,选用 MLX90614 ESF - DAA 型红外温度传感器对奶牛体温进行无线、远距离测量,传感器测量温度范围为 -70 ~ 380℃,在奶牛体温范围内精度达到 ±0.1℃。PENG 等^[21]介绍了一种基于红外测温仪的奶牛体温测量方法,可以实现对奶牛体温的准确测量和监测。红外测温仪可以测量较大范围的温度,并可以实时显示温度分布情况,一般选用奶牛眼温或者耳温代表奶牛的体温^[22]。WANG 等^[23]设计一种红外热像仪和辅助传感器结合的非侵入式牛体温测量方法,通过添加风速仪和温湿度计作为辅助传感器来减少环境因素对奶牛体温测量的影响,从而提高奶牛体温的测量精度,与记录的直肠参考温度均值和标准差差值分别为 0.04℃和 0.10℃,满足实际应用的精度要求。何东健等^[24]选用测温范围为 -20 ~ 150℃、测量精度为 ±2℃的 MAG62 型在线红外热像仪,首先使用骨架树模型对图像中的眼部进行定位和提取,然后通过红外热像仪获取奶

牛眼部的温度图像,最后计算出奶牛眼温,实现奶牛眼温无接触、自动、高精度检测,平均误差为0.38%。WANG等^[25]通过FLIR A310在线式红外热像仪实时获取奶牛体表温度分布情况,该设备的测量范围为-20~120℃,测量精度为±2℃,通过以太网/IP协议与计算机通信。红外设备进行奶牛体温测量具有非侵入式、简单易操作、测量快速、精度高、可以连续监测奶牛的体温变化等优点,但是也存在一定的局限性,受环境因素影响较大,且测量结果易受到奶牛的活动、精神状态、毛发等因素的影响。

1.2 体尺测量及体质量估测

体尺和体质量可以反映奶牛的体型和营养状况,通过对奶牛身体各部位的尺寸进行测量,进而建立回归模型实现对奶牛体质量的估测,可以对奶牛的生长、发育、健康和生产性能等方面进行评估^[26]。传统的奶牛体尺数据是通过卷尺、皮尺等工具进行手工测量,这种方法需要近距离与奶牛进行接触,奶牛易产生应激反应,且手工测量费时费力^[27]。随着深度相机及激光扫描仪等设备在农业领域的应用,出现了基于计算机视觉和图像处理技术的自动化奶牛体尺测量系统。这些系统在利用相机和扫描仪等设备获取奶牛图像的基础上,应用图像处理算法和三维点云处理技术实现对奶牛身体各部位的自动测量和数据分析,不需要近距离接触奶牛,避免了应激反应的发生,同时也大大提高了测量的效率和精度。

在奶牛自动体尺测量研究中,计算机视觉技术主要用于奶牛图像处理和分析。研究的初期,研究者主要分析奶牛的二维图像,根据不同体尺参数的特征来识别二维图像中奶牛的体尺测点,通常是通过距离、曲率等方法进行识别^[28],同时运用小孔成像等原理将图像像素转换成体尺的实际值^[29]。基于二维图像进行奶牛的体尺计算误差较大,三维点云技术逐渐应用于奶牛体尺测量领域。有研究者利用双目相机或两个摄像设备采集奶牛图像,并利用双目视觉原理将体尺测点转换成空间三维坐标,利用欧氏距离计算奶牛体尺参数,实现体尺参数无接触式测量^[30-31]。体尺测点识别的准确度对奶牛体尺测量有着较大的影响,有研究者结合二维与三维来测量体尺。初梦苑^[32]利用深度相机获取奶牛三维点云,将点云降维至二维图像后利用投影曲线峰值进行体尺测点提取,重建点云进行体尺参数的计算,体尺测量的平均相对误差均小于2.56%。COZLER等^[33]利用三维激光扫描仪直接获取奶牛体表点云数据,构建奶牛模型后进行体尺参数计算。由于三维图像成本和点云处理时间较长等问题,实际应用并不广泛。

奶牛体质量是反映奶牛生长发育情况的重要指标之一,是检测奶牛生长发育状况的主要依据。长期以来,奶牛的体质量主要是通过体质量秤来测量,这种人工测量方法效率比较低^[34]。随着技术的发展,计算机视觉等技术也被应用于体质量等生理参数的估测。多元回归模型是奶牛体质量估测的常用方法,NUGRAHA等^[35]基于估算的奶牛体积建立回归模型进而测算奶牛的体质量。HAQ等^[36]采集了奶牛的体尺和体质量数据,然后利用多元线性回归和因子分析得出的体质量估测模型来对奶牛体质量进行估测。孙子杰^[29]基于体高、体长、胸深和臀围4个参数用逐步回归法建立多元回归模型来对牛体质量进行估测,平均误差为7.79%。初梦苑^[32]则通过奶牛外观的三维重建获取奶牛体积和表面积,进而训练多元线性回归模型估测奶牛的体质量,估测体质量的绝对误差在-24.28~17.24 kg之间。基于计算机视觉技术的奶牛体质量估测可以实现非接触式测量,但其准确度仍有待提高。因此,在进行测量时,需要充分考虑牛只毛发对测量结果的影响。

1.3 呼吸频率监测

奶牛在正常情况下的呼吸频率为12~28次/min^[37]。当奶牛处于不适宜的气候条件下或者受到疾病的影响时,呼吸频率可能会增加或减少,呼吸深度也会有所改变,这些都可能是奶牛存在健康问题的表现^[38]。传统的奶牛呼吸频率监测主要是通过人工观察奶牛腹部运动来判断。观察人员需要在一定时间内记录奶牛腹部的起伏情况,这种方式需要消耗大量的人力成本,且要求观察人员有较强的专业知识和技能^[39]。

近年来,传感器、摄像机、红外热像仪等设备在奶牛呼吸频率监测方面得到了应用。传感器主要通过呼吸时的鼻孔附近空气温度及腹部的运动变化来进行频率的计算。MILAN等^[40]将温度传感器固定在牛的鼻孔附近监测牛鼻孔附近空气的温度变化,根据温度信号的振荡次数计算出奶牛呼吸频率。SALZER等^[41]使用MooCall HEAT鼻环传感器监测奶牛鼻孔的开合程度和振幅来计算呼吸频率和呼吸深度,可以实现实时监测。STRUTZKE等^[42]利用压差传感器,通过监测奶牛鼻腔呼气压力与环境压力的压力差,计算出奶牛的呼吸频率。通过传感器监测奶牛呼吸频率,需要首先进行传感器的正确安装,操作较为复杂,且影响奶牛的舒适度,同时温度、湿度等环境因素也会影响传感器稳定性和精度。图2为奶牛呼吸行为监测的传感器及安装示例。

在摄像机采集奶牛视频数据的基础上,应用计算机视觉、深度学习等方法分析奶牛呼吸时躯干花

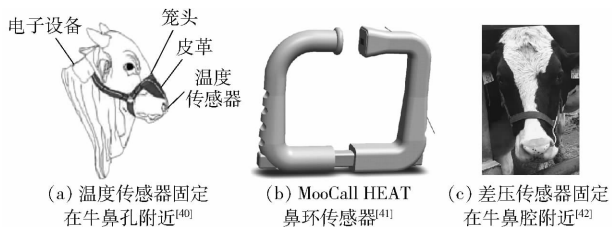


图2 奶牛呼吸行为监测的传感器及安装示例

Fig.2 Sensors and installation examples for monitoring respiratory behavior of cows

斑或者条纹的规律性变化,也可以实现奶牛呼吸行为的监测。赵凯旋等^[43]利用 Horn – Schunck 约束算法的光流法对视频帧图像像素点的相对速度进行计算,然后通过动态计算速度方向曲线进行呼吸频率的计算,与人工方法相比,呼吸频率计算准确率为 95.68%。文献[44 – 45]采用 Lucas – Kanade 稀疏光流算法对奶牛花斑边界进行光流计算和提取,以此来计算奶牛呼吸频率,平均误差为 2.4 次/min。WU 等^[46]通过卷积神经网络和双向长短记忆网络来检测奶牛胸部和腹部的运动,监测奶牛的呼吸行为,在测试集上平均准确率为 93.56%。基于视频数据的奶牛呼吸行为监测可以实现非接触式的呼吸频率计算,但是奶牛呼吸行为微弱,易受到干扰,在实际应用中比较困难,需要提高监测的精准度来增强其适用性。

基于热成像技术的监测方法是一种利用红外线热成像相机实时检测动物呼吸运动的技术。热成像技术也根据奶牛呼吸时的鼻孔附近空气温度及腹部的运动变化来计算呼吸频率。STEWART 等^[47]采用 ThermaCam S60 型红外热像仪监测奶牛鼻孔附近的温度变化来计算呼吸频率,而 CHAVEZ 等^[48]选用小巧型 FLIR AX8 热像仪,固定在手机上移动监测奶牛呼吸气流引起的鼻部区域像素强度值变化来计算其呼吸频率。KIM 等^[49]选用适用于 IOS 的 FLIR One Pro 移动热成像相机,通过监测牛鼻孔和口腔等感兴趣区域 (Region of interest, ROI) 的温度变化来测量奶牛呼吸频率和深度。利用红外热像仪对奶牛呼吸行为进行监测可以实现非接触式的测量,但是技术成本较高,且环境对于红外热像仪的应用也会有影响,与实际应用仍有一定差距。

2 奶牛行为监测

奶牛行为监测是通过对奶牛的活动、姿态、运动轨迹、声音等方面的监测和分析,获取奶牛行为模式和特征信息的过程^[50]。

2.1 基本运动行为监测

奶牛基本行为监测包括奶牛的躺卧、行走和站

立等,可以判断奶牛舒适、发情、疾病等情况。利用智能传感器、计算机视觉和机器学习等技术,可以实现对奶牛基本运动行为的实时监测和识别^[51]。奶牛基本运动行为监测研究部分成果如表 2 所示。

表 2 奶牛基本运动行为监测相关研究部分成果

Tab.2 Partial achievements of research on monitoring basic exercise behavior of dairy cows

监测设备	行为类型	原理	平均准确率/%	文献序号
传感器	躺卧、站立、行走等	利用传感器获取奶牛运动数据,然后通过随机森林等机器学习算法对奶牛行为进行分类	>90	[52 – 55]
	躺卧、站立、行走、进食等	摄像机获取奶牛视频图像,进行奶牛目标的识别后,利用神经网络模型实现奶牛的行为分类	>95	[56 – 59]

奶牛基本行为监测中,运动传感器的应用较多。BNO055 型运动传感器是 9 轴综合惯性传感器,集成了加速度计、陀螺仪和磁力计等多种传感器,并用了自适应传感器融合算法,能够提供高精度的运动参数,但价格成本较高。SCHMELING 等^[52]利用 BNO055 型运动传感器获取奶牛运动数据,用随机森林算法对奶牛是否躺卧行为进行分类。这种算法只能区分出奶牛的躺卧行为,适用范围较窄。王俊等^[53]将 ADXL345 型传感器佩戴在奶牛的右后腿来获取奶牛运动数据,通过改进的模糊聚类算法对奶牛 7 类运动行为进行判别。奶牛在不同的行为运动时,其背部的倾斜度会有所不同,ACHOUR 等^[54]利用这一特征,将 MPU – 9250 型惯性测量单元芯片安装在奶牛的背部以追踪奶牛背部的倾斜,进而对奶牛行为实现监测和分类。DANG 等^[55]将运动跟踪传感器安装在奶牛颈部来记录奶牛的运动数据,应用支持向量机、决策树、一维卷积神经网络 (1D convolutional neural networks, 1D – CNN) 和长短期记忆网络 (Long short term memory, LSTM) 模型进行行为分类分析,研究表明, LSTM – RNN 模型的分类准确率最高,达到 98.97%。利用传感器设备,研究人员可以采集奶牛的运动和姿势等特征进行行为分类和判别,但在实际应用中,需要考虑奶牛舒适度、设备的适用度等因素。

在摄像机采集奶牛视频的基础上,应用图像分析、深度学习等方法识别奶牛行为,是奶牛基本行为监测的非接触式监测方法。MCDONAGH 等^[56]利用海康威视 HD Bullet 型摄像机对每头牛在产仔前

10 h 的行为以每秒 20 帧的速度进行记录,利用非局部神经网络进行训练和验证,结果表明,非局部网络在 80% 或更多的时间内正确地对 7 种行为进行了分类。WU 等^[57]利用海康威视 DS-2DM1-714 型圆顶网络摄像头对奶牛行为的活动视频信息进行采集和处理,利用 VGG16 作为网络骨架提取视频特征向量序列,再通过双向长短期记忆分类模型(Bi-directional long short-term memory, BiLSTM)对这些特征进行分类,实现了对奶牛 5 种基本行为的自动识别,平均识别准确率为 97.60%,行为识别的平均时间为 0.712 s,可以达到实时识别的要求。杜新宇^[58]对摄像机拍摄的奶牛视频进行预处理,利用卷积神经网络模型(Convolutional neural networks, CNN)对跟踪的奶牛进行行为识别,实验结果表明,模型对站立、行走和躺卧行为的识别准确率都在 90% 以上。YIN 等^[59]选用 SONGHDR-CX290 型摄影机拍摄奶牛视频,应用卷积神经网络来提取奶牛不同行为的特征,将行为特征信息发送到 BiLSTM

模块,实现视频帧在时间序列中的聚合,从而实现奶牛行为的识别与分类,识别精度为 97.87%,并与滑动窗口机制相结合,实现对未分割目标奶牛视频的行为识别。通过图像分析、深度学习技术进行奶牛基本行为的识别,大大减少了人工识别的工作量 and 时间成本,具有高效性,但是该类方法需要大量的数据进行模型训练,数据量要求较高,且模型的训练和优化比较耗时。

2.2 反刍行为监测

反刍是奶牛正常的消化生理过程之一,能够反映奶牛的消化功能和健康状况^[60]。奶牛反刍行为监测手段包括传感器监测和视频监测两种。传感器监测主要通过植入或佩戴相应传感器,监测奶牛的咀嚼运动,从而判断奶牛是否在进行反刍。视频监测则是通过摄像头获取影像数据,再利用计算机视觉技术对奶牛的行为特征等信息进行分析和识别^[61]。奶牛反刍行为监测研究部分成果如表 3 所示。

表 3 奶牛反刍行为监测相关研究部分成果

Tab.3 Partial achievements in research on monitoring rumination behavior of dairy cows

监测设备	技术方法	反刍特征	准确率/%	文献序号
加速度传感器、声音传感器	支持向量机算法	监测奶牛反刍时姿态和声音的变化	81.30	[62]
压力传感器	决策树分类器	监测奶牛反刍时鼻子压力的变化	95.38	[63]
新型活动传感器	Logistic 回归模型	传感器固定在奶牛颈部,监测反刍时头部的抖动变化	94.50	[64]
三轴加速度传感器	k 近邻分类算法	传感器固定在奶牛下颚,监测奶牛下颚运动变化	93.70	[65]
三轴加速度耳标	时域分析方法和 k 近邻分类算法的结合	监测奶牛反刍时头部的运动变化	97.40	[66]
摄像机	均值漂移聚类算法	视频跟踪奶牛下颚运动,并提取奶牛嘴部运动轨迹曲线	92.03	[67]
摄像机	卡尔曼滤波目标跟踪算法	跟踪奶牛上颚区域运动,监测嘴部咀嚼曲线的变化	96.93	[68]
摄像机	卷积神经网络模型	提取奶牛反刍图像特征进行行为分类	95.00	[69]
摄像机	核相关滤波目标跟踪算法	跟踪奶牛嘴部运动,监测反刍时嘴部咀嚼曲线的变化	94.10	[70]

当奶牛开始反刍时,头部和颈部会有规律性的运动,这些运动会引起加速度传感器的震动,通过分析加速度传感器的信号来确定奶牛的反刍状态。王莉薇等^[62]设计了一种奶牛反刍多源信息监测装置,通过获取奶牛反刍声音和姿态信息来监测奶牛反刍行为,实验测试装置检测的准确率可达 81.30%。张爱静^[63]将压力传感器安装在奶牛的鼻羁上来记录鼻羁压力信号,利用机器学习算法和数据分析方法对压力信号进行分析,可以实现反刍行为频率、持续时间和反刍次数的监测。WU 等^[64]根据液体晃动原理设计了一种超低功耗的新型传感器,将其安装在奶牛的颈部,利用传感器收集的信息训练 Logistic 回归模型,测试集上反刍检测准确率可达 94.50%。SHEN 等^[65]将三轴加速度传感器固定在奶牛下颌中间部位,捕捉奶牛进食行为的特征后使

用 k 近邻算法(K nearest neighbors, KNN)对奶牛的行为进行分类,以此来监测奶牛的反刍行为。CHANG 等^[66]利用三轴加速度耳标来获取奶牛行为信息,比较了不同的分析方法以及个体动物模型和通用模型在监测反刍行为方面的效果,研究结果表明,使用时域分析方法和 KNN 算法的组合可以在较高的准确率下检测奶牛反刍行为,其平均准确率达到 97.40%。利用传感器进行反刍行为的监测,传感器的安装可能会对奶牛采食造成影响,易产生应激反应,此外,传感器易与牧场物体产生刮蹭。

基于计算机视觉和深度学习的奶牛反刍行为识别和分析是目前比较有效的监测方法。视频监测是利用摄像头进行奶牛视频的采集,然后通过捕捉奶牛嘴部的运动来进行反刍行为的识别。CHEN 等^[67]采用均值漂移算法(Mean-Shift)对视频中奶

牛下颌运动进行精准跟踪,提取奶牛嘴部运动的质心轨迹曲线,从而实现对奶牛反刍行为的监测,该方法对单目标奶牛反刍行为监测是可行的,但在多目标监测上不太理想。毛燕茹等^[68]提出了一种基于嘴部区域跟踪的多目标奶牛反刍行为智能监测方法,通过 Kalman 滤波和 Hungarian 算法等图像处理技术对奶牛嘴部的位置进行跟踪,并从中提取出奶牛的进食和反刍行为信息,从而实现多目标奶牛个体的嘴部跟踪和反刍行为监测,反刍时长误差的平均值为 1.48 s。AYADI 等^[69]对采集的视频使用了一种基于卷积神经网络的反刍检测模型,将奶牛行为分成反刍和其他两类,通过对奶牛饲料和牧场环境的数据进行训练和学习,实现对奶牛反刍行为的准确检测,结果表明该方法的反刍行为识别平均准确率为 95.00%。WANG 等^[70]将 YOLO (You only look once)算法与核相关滤波器相结合实现对奶牛嘴部区域的识别,然后利用帧差法得到的参数构建反刍识别算法,计算反刍时间和咀嚼次数,实验结果表明,反刍时间的平均误差为 5.90%,咀嚼次数的平均误差为 8.13%。视频监测技术可以实现对奶牛反刍行为的无接触监测,但是目前仍存在一些局限性。视频监测技术在实际应用时,需要较高质量的设备和技术来对奶牛视频数据进行高质量的采集和处理,同时由于奶牛反刍动作幅度较小,需要采用精确的目标跟踪和分割算法对目标区域进行准确跟踪和分割。

2.3 跛行行为监测

奶牛跛行是指奶牛行走时出现的异常步态,可能是由蹄趾病或其他因素引起的^[71]。这种不适会影响奶牛的正常生理活动,进而影响其产奶量和繁殖力,对奶牛健康有着极大的影响^[72]。人工观察是传统的跛行行为监测方法,然而,随着奶牛养殖规模的扩大,人工识别劳动成本变得越来越高^[73]。随着科技的发展,传感器和计算机视觉等技术逐渐成为奶牛跛行行为监测的有力手段,奶牛跛行行为监测研究部分成果如表 4 所示。

奶牛跛行时活动量会变少,行走时的步态也会发生变化,传感器通常通过监测这些特征来识别跛行行为。HALADJIAN 等^[74]在研究中将运动传感器固定在正常奶牛的左后腿上,记录行走数据,并建立基准步态模型。通过将奶牛的行走步态与基准步态模型进行比较,可以将奶牛的步态分类为正常或异常。然而,这种方法只是对奶牛的行走步态进行比较,在轻度跛行的识别上效果不太理想。苏力德^[75]使用三轴加速度传感器采集奶牛趾蹄加速度信号,并从中提取奶牛的步态特征。然后应用优化后的逻辑

表 4 奶牛跛行行为监测相关研究部分成果				
Tab.4 Part of research results on monitoring lameness behavior in dairy cows				
设备类型	技术方法	跛行特征	准确率/%	文献序号
传感器	支持向量机	步态异常	91.10	[74]
加速度传感器	逻辑回归模型	行走速度、步态对称性、步幅等	91.83	[75]
		牛蹄跟随性	93.30	[76]
可见光摄像机	神经网络检测模型	行走速度	95.37	[77]
可见光摄像机	双侧长短期记忆模型	弓背	96.61	[78]
可见光摄像机	长短期记忆分类模型	步态对称性、相对步长	98.57	[79]

辑回归模型对奶牛的跛行进行识别分类,试验结果表明,识别准确率为 91.83%。虽然利用传感器进行奶牛跛行的监测是一种有效的方法,但需要将传感器等设备安装在奶牛的脚踝位置,这会对奶牛的正常活动产生影响,且易受到环境的影响。此外,接触式设备的安装和维护过程中,易引起奶牛的应激反应。

通过摄像机设备采集奶牛视频数据,然后利用计算机视觉等技术进行奶牛跛行的检测,主要是根据奶牛跛行时背部曲率、步长、行走轨迹等特征展开。康熙等^[76]根据奶牛跛行时前后蹄着地的距离与正常时相差较大的特征,提出了一种时空插值算法对牛蹄进行定位,基于改进 Hough 变换的牛蹄圆形检测算法和基于神经网络的跛行检测算法,对跛行奶牛进行了检测和识别。尹玉^[77]提出了以奶牛行走速度为特征进行跛行检测的方法,构建了基于支持向量机的奶牛跛行检测模型。跛行分类试验结果表明,该检测模型的平均跛行识别率达到 95.37%。JIANG 等^[78]提出了一种将机器视觉技术与深度学习算法相结合的跛行检测方法,从分割出的奶牛图像中提取奶牛背部曲率数据,然后使用噪声+双侧长短期记忆模型来预测奶牛跛行的曲率数据,并匹配奶牛跛行的弯曲特征,从而对奶牛跛行进行检测和分类,平均准确率为 96.61%。WU 等^[79]提出了一种基于相对步长特征向量的跛脚牛和非跛脚牛分类方法,基于腿坐标计算奶牛前后腿的相对步长,构建相对步长特征向量,应用经过训练的长短期记忆分类模型对奶牛跛行进行分类,准确率可达 98.57%。

3 奶牛健康监测应用系统案例

随着物联网、大数据、人工智能等技术被广泛应

用于畜牧业,在智慧养殖方面已开发有各种健康监测应用系统。

Allflex 是新西兰的牲畜识别服务提供商,其产品包括各种耳标、注射芯片、颈圈等,可以实现对牲畜的身份认证、追溯和管理。Allflex 的系列智能解决方案,可以通过收集和分析奶牛的行为、生理、环境等数据,为养殖者提供全面的健康监测和管理服务。Allflex 的产品在欧洲、北美、大洋洲等地得到广泛应用。COWSCOUT 是由德国 GEA 公司开发的奶牛监测系统,该系统通过给每头奶牛安装一个带有传感器和无线通讯模块的项圈或耳标,可以实时监测奶牛的位置、活动量、咀嚼次数等数据,并通过无线网络传输到云端平台。平台上可以对数据进行分析 and 展示,为养殖者提供各种报告和预警信息。COWSCOUT 系统在欧洲牧场得到广泛应用,特别在荷兰、德国等乳制品生产大国有着显著影响。挪威 Nofence 公司开发了一种基于 GPS 和移动网络的智能牧场系统,通过在奶牛颈部佩戴智能项圈,实时监测和控制奶牛的放牧范围和时间,避免奶牛进入禁区或走失。当奶牛接近虚拟围栏时,智能项圈会发出声音或震动信号,提示奶牛改变方向。该系统可以通过手机 APP 或网页端进行设置和管理,可以根据季节、天气、草场状况等因素调整虚拟围栏的位置和大小,也可以查看每头奶牛的位置、活动量、放牧时间等数据。Nofence 系统在挪威等北欧国家的山地放牧场得到了广泛应用。Nofence 公司的智能项圈如图 3 所示。美国的智能农业公司 Connecterra 开发了名为 Ida 的奶牛监测系统,通过安装传感器和摄像头等设备,对奶牛的生理参数、行为和环境进行实时监测和管理,并使用机器学习算法对这些数据进行分析和预测,以实现乳腺炎的精准预测和防控。Connecterra 的 Ida 系统在美国、欧洲等地得到了应用,为养殖者提供了精细化的健康监测服务。

国内的奶牛健康监测研究起步较晚,但无人化设施养殖发展势头强劲^[80]。近年来,我国奶牛养殖业结构逐渐向着集成化、自动化、规模化和现代化的



图 3 Nofence 公司的智能项圈
Fig. 3 Nofence's intelligent collar

方向发展^[81-82],健康监测系统的研究与应用也取得了显著进展。我国的中农智联研发生产的 5G 智能测温耳标,采用 5G 物联网通信技术,将获取的牲畜位置和活体信息远程上传至云端,并通过大数据分析,对牲畜的健康、发情状况进行判断。中农智联系统在中国的农牧场得到了广泛应用,特别在遥远或偏远地区。中农智联智慧牛场管理系统平台如图 4 所示。阿里云与湖南省畜牧科学研究所合作开发的“智牧”奶牛智能养殖系统,通过安装在奶牛身上的传感器,实现对奶牛的体温、活动、进食等数据的实时监测和分析。该系统还可以结合阿里云的人工智能技术,对数据进行预测和分析,提供健康预警和养殖建议。“智牧”奶牛智能养殖系统在湖南省得到了应用,具有多维度监测、数据分析和智能决策支持等特点。



图 4 中农智联智慧牛场管理系统平台
Fig. 4 Zhongnong Zhilian smart cattle farm management system platform

奶牛健康监测系统的应用案例表明智能技术在养殖业中的巨大潜力,智能化的奶牛健康监测系统可以实时、准确、全面地收集和處理奶牛的行为、生理、环境等信息,为养殖者提供及时、有效的决策支持;可以及早发现并预防奶牛的疾病和异常情况,提高奶牛的福利和产量,降低养殖成本和风险,降低劳动强度和人为误差。养殖者应该根据自身的需求和实际条件,选择合适的设备,开发或改进应用系统,以实现奶牛健康的有效监测。同时,随着技术创新和应用的推广,智能化的奶牛健康监测系统有望为全球养殖业带来更大的变革。

4 结束语

奶牛的生理参数和行为的即时准确监测是实现奶牛精准化健康管理调控的基础,也是对奶牛产品质量评定的重要依据。奶牛健康监测主要分为接触式的传感器监测方式和非接触式的视觉监测方式。接触式传感器可以直接监测奶牛的生理指标,例如体温、呼吸等,具有准确性高、实时性强的优点。但是,安装这些传感器需要对奶牛进行一定程度的侵入性操作,可能会对奶牛造成一定的压力和不适。

相比之下,非接触式的视觉监测方式则无需对奶牛进行侵入性操作,可以通过摄像头等设备对奶牛的行为和外貌特征进行监测。这种方式不仅可以监测奶牛的健康状况,还可以分析奶牛的行为模式,例如饮食、运动和休息等。但是,这种方式受到环境因素和光线等条件的影响,准确性可能会受到一定程度的影响。

本文在分析设备和技术的基础上,结合当前已有的应用案例,总结奶牛健康监测面临的难点并提出建议:

(1)监测设备成本高、维护不易、普适性有待提高。目前,基于物联网技术的奶牛智慧养殖系统,主要依靠给奶牛佩戴可穿戴设备,如项圈、蹄环、耳标等,来收集奶牛的体温、心率、活动量、反刍次数等数据。这些设备虽然能够实现实时、连续、无创的监测,但也存在一些缺点,如给奶牛带来压力和不适感,增加奶牛感染疾病的风险,需要定期更换电池和清洁设备,以及设备价格昂贵,难以在大规模养殖场推广应用。对于监测设备,提高监测设备的小型化、集成化、低成本化和普适化。为了减少对奶牛的干扰和压力,需要提高监测设备安装和维护的便利性,开发更小巧、轻便、耐用、节能的可穿戴设备。同时,通过多种场景的测试和应用,提高监测设备的兼容性和通用性,使其能够适应不同品种、不同规模、不同环境的奶牛养殖场。

(2)监测数据的分析方法有一定局限性,深层

次数据特征有待挖掘。目前,对于奶牛健康数据的分析主要采用统计学和深度学习方法,建立奶牛健康状态和生理参数之间的关系模型。这些方法虽然能够发现一些规律和趋势,但也存在一些问题,如忽略了奶牛个体之间的差异性和复杂性,忽略了奶牛健康状态和环境因素之间的相互作用,以及模型泛化能力弱,难以适应不同场景和条件下的数据变化。针对以上情况,要提高监测数据的多样化、全面化和实时化。通过增加传感器或升级传感器,来对奶牛的各项数据进行多种类、高质量、高频率的采集,并利用当前快速发展的 5G 等通信技术提高监测数据的传输和处理的速度和效率,使其能够实时反馈奶牛健康状况,及时发现异常和风险。对于监测数据的分析方法,运用和改进数据挖掘、机器学习、深度学习等技术,建立更准确、稳定、泛化性强的数据模型,发现深层次的特征和规律。

(3)监测系统的集成度、功能性和智能化程度尚有提高空间。目前在国内应用的奶牛健康监测系统多为功能针对性较强的产品或服务,这些系统虽然能够满足部分养殖场的需求,但也无法实现对奶牛健康全过程的监测和调控管理。此外,这些系统多为被动式的监测和报警,缺乏主动式的预测和干预功能。需要实现智能化的决策支持和优化建议,开发综合性的奶牛健康监测系统,将不同类型、不同功能、不同来源的监测设备和数据进行有效地集成,提供更完善、全面、便捷的奶牛健康自动化监测服务。

参 考 文 献

[1] 李春平,朱新培,孙开兰,等. 奶牛养殖产业发展现状及对策研究[J]. 中国乳业, 2022(2): 22-25.

[2] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2022.

[3] 康熙,刘刚,初梦苑,等. 基于计算机视觉的奶牛生理参数监测与疾病诊断研究进展及挑战[J]. 智慧农业(中英文), 2022, 4(2): 1-18.

KANG Xi, LIU Gang, CHU Mengyuan, et al. Advances and challenges in physiological parameters monitoring and diseases diagnosing of dairy cows based on computer vision[J]. Smart Agriculture, 2022, 4(2): 1-18. (in Chinese)

[4] 王政,宋怀波,王云飞,等. 奶牛运动行为智能监测研究进展与技术趋势[J]. 智慧农业(中英文), 2022, 4(2): 36-52.

WANG Zheng, SONG Huaibo, WANG Yunfei, et al. Research progress and technology trend of intelligent morning of dairy cow motion behavior[J]. Smart Agriculture, 2022, 4(2): 36-52. (in Chinese)

[5] QIAO Y, KONG H, CLARK C, et al. Intelligent perception-based cattle lameness detection and behaviour recognition: a review[J]. Animals, 2021, 11(11): 3033.

[6] 谢秋菊,刘学飞,郑萍,等. 畜禽体温自动监测技术及应用研究进展[J]. 农业工程学报, 2022, 38(15): 212-225.

XIE Qiuju, LIU Xuefei, ZHENG Ping, et al. Technology and application in automatic monitoring of the body temperature for livestock and poultry[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(15): 212-225. (in Chinese)

[7] 寇红祥,赵福平,任康,等. 奶牛体温与活动量检测及变化规律研究进展[J]. 畜牧兽医学报, 2016, 47(7): 1306-1315.

KOU Hongxiang, ZHAO Fuping, REN Kang, et al. The progress on detection method and the regularities of body temperature and activities in dairy cows[J]. Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica, 2016, 47(7): 1306-1315. (in Chinese)

[8] 张磊,董茹月,侯宇,等. 奶牛体温评价指标及测定方法研究进展[J]. 动物营养学报, 2020, 32(2): 548-557.

ZHANG Lei, DONG Ruyue, HOU Yu, et al. Research progress on evaluation indices and measurements of body temperature in dairy cows[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2020, 32(2): 548-557. (in Chinese)

[9] IWASAKI W, ISHIDA S, KONDO D, et al. Monitoring of the core body temperature of cows using implantable wireless thermometers[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 163: 104849.

- [10] CHUNG H, LI J, KIM Y, et al. Using implantable biosensors and wearable scanners to monitor dairy cattle's core body temperature in real-time[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, 174: 105453.
- [11] 刘忠超, 范伟强, 张会娟, 等. 基于 Android 的奶牛体温实时远程监测系统的设计[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2017(12): 6-9, 282-283.
LIU Zhongchao, FAN Weiqiang, ZHANG Huijuan, et al. Design of real-time remote monitoring system for cow body temperature based on Android[J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2017(12): 6-9, 282-283. (in Chinese)
- [12] 屈东东, 刘素梅, 吴金杰, 等. 群养奶牛体温实时监测系统设计与实现[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(增刊): 408-412.
QU Dongdong, LIU Sumei, WU Jinjie, et al. Design and implementation of monitoring system for multiple cows body temperature[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(Supp.): 408-412. (in Chinese)
- [13] CHEN P. Dairy cow health monitoring system based on NB-IoT communication[C]//2019 International Conference on Electronic Engineering and Informatics (EEI), 2019: 393-396.
- [14] NOOTYASKOOL S, OUNSRIMUNG P. Smart collar design to predict cow behavior[C]//2020 17th International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering (JCSSE). IEEE, 2020: 92-97.
- [15] DAEWIS D, MEHTA R, WATI N, et al. Digital smart collar: monitoring cow health using internet of things[C]//2022 International Symposium on Electronics and Smart Devices (ISESD). IEEE, 2022: 1-5.
- [16] SINGHAL G, CHOUDHARY P, ABHISHEK V, et al. Cattle collar: an end-to-end multi-model framework for cattle monitoring[C]//2022 IEEE 5th International Conference on Multimedia Information Processing and Retrieval (MIPR). IEEE, 2022: 401-407.
- [17] REHMAN U, ARSHAD J, SADIQ M, et al. Implementation of an intelligent animal monitoring system using wireless sensor network and IoT platform[C]//2022 International Conference on Cyber Resilience (ICCR), 2022: 1-11.
- [18] ANUSUYA T, THULASIRAMAN K. Detection of milk fever based on real time temperature monitoring in dairy cattle using neural network[J]. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2020, 4: 122-127.
- [19] LONG X, SUN C, TAN M. Design and implementation of intelligent ear tag for dairy cows in farms[C]//Computer Science Proceedings of the 2020 9th International Conference on Software and Computer Applications, 2020: 297-301.
- [20] 刘忠超, 丁筌华, 范灵燕, 等. 基于 WiFi 和云端的奶牛体温监测系统设计与实现[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2022(8): 55-59, 132.
LIU Zhongchao, DING Qianhua, FAN Lingyan, et al. Design of cow temperature monitoring system based on WiFi and cloud[J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2022(8): 55-59, 132. (in Chinese)
- [21] 何沛桐, 张建华, 张凝, 等. 基于视觉感知的畜禽智慧养殖管理与疫病诊断研究进展[J]. *中国农业大学学报*, 2023, 28(10): 141-165.
- [22] PENG D, CHEN S, LI G, et al. Infrared thermography measured body surface temperature and its relationship with rectal temperature in dairy cows under different temperature-humidity indexes[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2019, 63: 327-336.
- [23] WANG F, SHIH J, JUAN P, et al. Non-invasive cattle body temperature measurement using infrared thermography and auxiliary sensors[J]. *Sensors*, 2021, 21(7): 2425.
- [24] 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)
- [25] WANG C, WANG H, SU L, et al. A non contact cow estrus monitoring method based on the thermal infrared images of cows[J]. *Agriculture*, 2023, 13(2): 385.
- [26] 孙雨坤, 岳奎忠, 李文茜, 等. 图像信息技术在奶牛生产中的应用[J]. *动物营养学报*, 2018, 30(5): 1626-1632.
SUN Yukun, YUE Kuizhong, LI Wenqian, et al. Application of image information technology in dairy cow production[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2018, 30(5): 1626-1632. (in Chinese)
- [27] 初梦苑, 司永胜, 李前, 等. 家畜体尺自动测量技术研究进展[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(13): 228-240.
CHU Mengyuan, SI Yongsheng, LI Qian, et al. Research advances in the automatic measurement technology for livestock body size[J]. *Transactions of the CSAE*, 2022, 38(13): 228-240. (in Chinese)
- [28] AI B, LI Q. SOLOv2-based multi-view contactless bovine body size measurement[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, 2294: 1-2.
- [29] 孙子杰. 基于机器视觉的牦牛体重估测[D]. 西宁: 青海大学, 2020.
SUN Zijie. Yak weight estimation methods based on machine vision[D]. Xining: Qinghai University, 2020. (in Chinese)
- [30] 李琦, 刘伟, 赵建敏. 基于双目视觉及 Mask RCNN 的牛体尺无接触测量[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2020(12): 46-50, 159-160.
- [31] 胡媛敏, 张寿明. 基于机器视觉的奶牛体尺测量[J]. *电子测量技术*, 2020, 43(20): 115-120.
HU Yuanmin, ZHANG Shouming. Dairy cow body measurement based on machine vision[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2020, 43(20): 115-120. (in Chinese)
- [32] 初梦苑. 基于三维重建的奶牛体尺检测与体重预估研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2020.
CHU Mengyuan. Research on body size measurement and weight estimation of cow based on three-dimensional reconstruction[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [33] COZLER L, ALLAIN C, CAILLOT A, et al. High-precision scanning system for complete 3D cow body shape imaging and

- analysis of morphological traits[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 157: 447 – 453.
- [34] 冯凡. 基于三维模型体积的奶牛体重预估研究[D]. 保定:河北农业大学, 2022.
FENG Fan. Research on cow body weight estimation based on 3D model volume[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [35] NUGRAHA U, WAHYU A. Weight measurement and identification of cow type using computer vision method[J]. *International Journal of Engineering & Technology*, 2018, 7(4.34): 291 – 294.
- [36] HAQ M, BUDISATRIA I, PANJONO P, et al. Prediction of live body weight using body measurements for JAWA BREBES (JABRES) cattle[J]. *Journal of Animal and Plant Sciences*, 2020, 30: 552 – 559.
- [37] 崔永国. 奶牛正常生理指标与检查方法[J]. *养殖技术顾问*, 2013(5): 18.
- [38] 於少文,孔繁涛,张建华,等. 可穿戴设备技术在奶牛养殖中的应用及发展趋势[J]. *中国农业科技导报*, 2016, 18(5): 102 – 110.
YU Shaowen, KONG Fantao, ZHANG Jianhua, et al. Application and development trend of wearable devices technology in dairy farming[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2016, 18(5): 102 – 110. (in Chinese)
- [39] 李奇峰,丁露雨,李洁,等. 奶牛呼吸频率自动监测技术研究进展[J]. *中国畜牧杂志*, 2019, 55(10): 52 – 57.
- [40] MILAN H F M, MAIA A S C, GEBREMEDHIN K G. Technical note: device for measuring respiration rate of cattle under field conditions[J]. *Journal of Animal Science*, 2016, 94(12): 5434 – 5438.
- [41] SALZER Y, LIDOR G, ROSENFELD L, et al. Technical note: a nose ring sensor system to monitor dairy cow cardiovascular and respiratory metrics[J]. *Journal of Animal Science*, 2022, 100(9):240.
- [42] STRUTZKE S, FISKE D, HOFFMANN G, et al. Technical note: development of a noninvasive respiration rate sensor for cattle[J]. *Journal of Dairy Science*, 2019, 102: 690 – 695.
- [43] 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. Detection of breathing rate and abnormality of dairy cattle based on video analysis [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(10): 258 – 263. (in Chinese)
- [44] 宋怀波,吴頌华,阴旭强,等. 基于 Lucas – Kanade 稀疏光流算法的奶牛呼吸行为检测[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(17): 215 – 224.
SONG Huaibo, WU Dihua, YIN Xuqiang, et al. Respiratory behavior detection of cow based on Lucas – Kanade sparse optical flow algorithm[J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(17): 215 – 224. (in Chinese)
- [45] WU D, YIN X, JIANG B, et al. Detection of the respiratory rate of standing cows by combining the Deeplab V3 + semantic segmentation model with the phase-based video magnification algorithm[J]. *Biosystems Engineering*, 2020, 192: 72 – 89.
- [46] WU D, HAN M, SONG H, et al. Monitoring the respiratory behavior of multiple cows based on computer vision and deep learning[J]. *Journal of Dairy Science*, 2023, 106(4): 2963 – 2979.
- [47] STEWART M, WILSON M, SCHAEFER A, et al. The use of infrared thermography and accelerometers for remote monitoring of dairy cow health and welfare[J]. *Journal of Dairy Science*, 2017, 100: 3893 – 3901.
- [48] CHAVEZ M, FUENTES S, DUNSHEA F R, et al. Modelling and validation of computer vision techniques to assess heart rate, eye temperature, ear-base temperature, and respiration rate in cattle[J]. *Animals*, 2019, 9: 1 – 2.
- [49] KIM S, HIDAKA Y. Breathing pattern analysis in cattle using infrared thermography and computer vision[J]. *Animals*, 2021, 11(1): 207.
- [50] 阴旭强. 基于深度学习的奶牛基本运动行为识别方法研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2021.
YIN Xuqiang. Basic motion behavior recognition of dairy cows based on deep learning[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021. (in Chinese)
- [51] 王政,宋怀波,王云飞,等. 奶牛运动行为智能监测研究进展与技术趋势[J]. *智慧农业(中英文)*, 2022, 4(2): 36 – 52.
WANG Zheng, SONG Huaibo, WANG Yunfei, et al. Research progress and technology trend of intelligent morning of dairy cow motion behavior[J]. *Smart Agriculture*, 2022, 4(2):36 – 52. (in Chinese)
- [52] SCHMELING L, ELMAMOOZ G, HOANG P, et al. Training and validating a machine learning model for the sensor-based monitoring of lying behavior in dairy cows on pasture and in the barn[J]. *Animals*, 2021,11:2660.
- [53] 王俊,谭骥,张海洋,等. 基于无线传感器网络的奶牛运动行为实时监测系统[J]. *家畜生态学报*, 2018, 39(10): 45 – 52.
- [54] ACHOUR B, BELKADI M, AOUDJIT R, et al. Classification of dairy cows' behavior by energy-efficient sensor[J]. *Journal of Reliable Intelligent Environments*, 2021, 8: 165 – 182.
- [55] DANG T, DANG N, TRAN V, et al. A LoRaWAN-based smart sensor tag for cow behavior monitoring[C] // 2022 IEEE Sensors. IEEE, 2022:1 – 4.
- [56] MCDONAGH J, TZIMIROPOULOS G, SLINGER K R, et al. Detecting dairy cow behavior using vision technology[J]. *Agriculture*, 2021, 11(7): 675.
- [57] WU D, WANG Y, HAN M, et al. Using a CNN – LSTM for basic behaviors detection of a single dairy cow in a complex environment[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, 182: 106016.
- [58] 杜新宇. 视频监控下的奶牛多目标实时行为识别研究[D]. 呼和浩特:内蒙古大学, 2022.
DU Xinyu. Research on multi-objective real-time dairy cow behavior recognition of video surveillance[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2022. (in Chinese)
- [59] YIN X, WU D, SHANG Y, et al. Using an EfficientNet – LSTM for the recognition of single cow's motion behaviours in a complicated environment[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, 177: 105707.

[60] 王云,芦娜,王洋,等. 奶牛反刍行为的智能化监测方法及其应用研究进展[J]. 中国饲料, 2021(7): 3-6.

[61] BEZEN R, EDAN Y, HALACHMI I. Computer vision system for measuring individual cow feed intake using RGB-D camera and deep learning algorithms[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 172: 105345.

[62] 王莉薇,谢秋菊,刘洪贵,等. 基于多源信息感知的奶牛反刍行为可穿戴式监测装置的研究[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2019(7): 47-51, 164-165.

[63] 张爱静. 基于鼻羁压力的奶牛反刍识别方法研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2019.
ZHANG Aijing. Rumination recognition method of dairy cows based on the noseband pressure[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019. (in Chinese)

[64] WU H, FAN D, BAI F, et al. Research on cow rumination monitoring based on new activity sensor[C] // 2019 9th International Conference on Information Science and Technology (ICIST), 2019: 1-2.

[65] SHEN W, CHENG F, ZHANG Y, et al. Automatic recognition of ingestive-related behaviors of dairy cows based on triaxial acceleration[J]. Information Processing in Agriculture, 2020, 7: 427-443.

[66] CHANG Z, FOGARTY S, MORAES E, et al. Detection of rumination in cattle using an accelerometer ear-tag: a comparison of analytical methods and individual animal and generic models[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 192: 106595.

[67] CHEN Y, HE D, FU Y, et al. Intelligent monitoring method of cow ruminant behavior based on video analysis technology[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10: 1-2.

[68] 毛燕茹,牛童,王鹏,等. 利用 Kalman 滤波和 Hungarian 算法的多目标奶牛嘴部跟踪及反刍监测[J]. 农业工程学报, 2021, 37(19): 192-201.
MAO Yanru, NIU Tong, WANG Peng, et al. Multi-target cow mouth tracking and rumination monitoring using Kalman filter and Hungarian algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(19): 192-201. (in Chinese)

[69] AYADI S, SAID B, JABBAR R, et al. Dairy cow rumination detection: a deep learning approach[C] // Distributed Computing for Emerging Smart Networks: Second International Workshop, DiCES-N 2020, 2020: 123-139.

[70] WANG Y, CHEN T, LI B, et al. Automatic identification and analysis of multi-object cattle rumination based on computer vision[J]. Journal of Animal Science and Technology, 2023, 65(3): 519.

[71] 公培涛. 奶牛肢蹄病的原因及防治措施[J]. 中国乳业, 2022(2): 54-57.

[72] 李前,初梦苑,康熙,等. 基于计算机视觉的奶牛跛行识别技术研究进展[J]. 农业工程学报, 2022, 38(15): 159-169.
LI Qian, CHU Mengyuan, KANG Xi, et al. Research progress on lameness recognition technology in dairy cows using computer vision[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(15): 159-169. (in Chinese)

[73] 韩书庆,张晶,程国栋,等. 奶牛跛行自动识别技术研究现状与挑战[J]. 智慧农业(中英文), 2020, 2(3): 21-36.
HAN Shuqing, ZHANG Jing, CHENG Guodong, et al. Current state and challenges of automatic lameness detection in dairy cattle[J]. Smart Agriculture, 2020, 2(3): 21-36. (in Chinese)

[74] HALADJIAN J, HAUG J, NÜSKE S, et al. A wearable sensor system for lameness detection in dairy cattle[J]. Multimodal Technologies and Interaction, 2018, 2: 1-2.

[75] 苏力德. 奶牛步态特征提取与早期跛行预测研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2020.
SU Lide. Study on dairy cows gait feature extraction and early lameness prediction[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[76] 康熙,张旭东,刘刚,等. 基于机器视觉的跛行奶牛牛蹄定位方法[J]. 农业机械学报, 2019, 50(增刊): 276-282.
KANG Xi, ZHANG Xudong, LIU Gang, et al. Hoof location method of lame dairy cows based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.): 276-282. (in Chinese)

[77] 尹玉. 奶牛运动目标检测与跛行识别的研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2021.
YIN Yu. Study on cow moving target detection and lameness recognition[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021. (in Chinese)

[78] JIANG B, SONG H, WANG H, et al. Dairy cow lameness detection using a back curvature feature[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 194: 106729.

[79] WU D, WU Q, YIN X, et al. Lameness detection of dairy cows based on the YOLOv3 deep learning algorithm and a relative step size characteristic vector[J]. Biosystems Engineering, 2020, 189: 150-163.

[80] 王丰,张波,周明旭,等. 国内外奶牛疫病预警监测技术发展现状[J]. 中国动物检疫, 2020, 37(10): 80-86.
WANG Feng, ZHANG Bo, ZHOU Mingxu, et al. Development status of early warning and surveillance technologies for cow diseases[J]. China Animal Health Inspection, 2020, 37(10): 80-86. (in Chinese)

[81] 高学杰. 高产奶牛养殖技术要点与疾病防控[J]. 畜禽业, 2022, 33(3): 128-130.

[82] 滕光辉. 畜禽设施精细养殖中信息感知与环境调控综述[J]. 智慧农业, 2019, 1(3): 1-12.
TENG Guanghui. Information sensing and environment control of precision facility livestock and poultry farming[J]. Smart Agriculture, 2019, 1(3): 1-12. (in Chinese)