

基于声学冲激响应的奶山羊呼吸及反刍同步监测方法

王天本^{1,2} 刘现涛^{1,2} 李张本^{1,2} 严宏昊^{1,2} 宋怀波^{1,2} 胡瑾^{1,2}

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100;

2. 农业农村部农业物联网重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 呼吸及反刍是奶山羊最基本的生理活动,及时准确地同步获取奶山羊的呼吸及反刍信息可以为评估奶山羊健康状况提供数据支撑。针对现有方法呼吸及反刍同步监测能力的不足,提出了一种基于声学冲激响应的单只静卧奶山羊呼吸及反刍同步监测方法。该方法首先利用声学在室内空间中的多径效应,实现奶山羊呼吸过程中胸脯起伏及反刍过程中嘴部咀嚼动作全向采集;其次计算收发信号的冲激响应,捕捉由呼吸及反刍运动造成多径信号周期性变化的特征;然后利用呼吸及反刍运动频率差实现呼吸和反刍信号的分离;最后经过幅度归一化、相位同步后实现呼吸及反刍波形的可视化。为了验证该方法的有效性,选用了不同朝向的静卧奶山羊进行呼吸及反刍监测试验,并分析了环境噪声对试验的影响,结果表明:对于不同朝向的奶山羊,该方法呼吸平均相对误差为2.60%,反刍平均相对误差为3.51%,平均漏帧率为2.49%,并对环境噪声有较强的抗干扰能力。

关键词: 奶山羊;呼吸及反刍;声学;冲激响应

中图分类号: S24; TN911

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2023)07-0322-10

OSID:



Simultaneously Monitoring Respiration and Ruminating Behavior of Dairy Goats Based on Acoustic Impulse Response

WANG Tianben^{1,2} LIU Xiantao^{1,2} LI Zhangben^{1,2} YAN Honghao^{1,2} SONG Huaibo^{1,2} HU Jin^{1,2}

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

2. Key Laboratory of Agricultural Internet of Things, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Respiration and rumination are the most basic physiological activities of dairy goats. The timely and accurate simultaneous obtain of the information on respiratory and rumination of dairy goats can provide data support for evaluating the health status of dairy goats. Aiming at the deficiency of the existing methods for simultaneous monitoring of respiration and rumination, a method for simultaneously monitoring respiration and rumination of a single lying dairy goats was proposed based on acoustic impulse response. Firstly, the multipath effect of acoustics in indoor space was used to realize omnidirectional acquisition of breast undulation during respiration and mouth chewing movement during rumination of dairy goats. Secondly, the impulse response of the received and transmitted signals was calculated to capture the characteristics of the periodic changes of multipath signals caused by respiration and rumination. Then the frequency difference of respiration and rumination was used to separate respiration and rumination signals. Finally, after amplitude normalization and phase synchronization, visualization of breath and rumination waveforms was realized. In order to verify the effectiveness of the method, the lying dairy goats were selected in different positions and orientations to conduct respiration and rumination monitoring experiments, and the influence of environmental noise on the test was analyzed. The results showed that for dairy goats at different orientations, the average relative error of this method was 2.60% for respiration, 3.51% for rumination, and 2.49% for frame leakage. The results of this study can provide technical support for the health monitoring of dairy goats with infectious diseases and other separately fed dairy goats.

Key words: dairy goats; respiration and rumination; acoustics; impulse response

收稿日期: 2022-12-19 修回日期: 2023-03-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YDF1100602)和中国博士后科学基金面上项目(2020M673504)

作者简介: 王天本(1989—),男,副教授,主要从事基于声波的行为感知研究,E-mail: wangtb@nwafu.edu.cn

通信作者: 宋怀波(1980—),男,教授,博士生导师,主要从事数字图像处理研究,E-mail: songhuaibo@nwafu.edu.cn

0 引言

近年来羊奶制品的市场规模不断扩大。据统计,2020 年全国羊奶市场规模为 160 亿元,2025 年将突破 200 亿元^[1]。随着羊奶市场的蓬勃发展,智能化是奶山羊产业发展的必然趋势。奶山羊个体生理体征监测是智能化养殖不可或缺的环节^[2]。呼吸及反刍是奶山羊基本的生理体征,准确地获取奶山羊个体的呼吸和反刍信息对于评估奶山羊健康状况,及时发现奶山羊患病个体具有重要意义^[3]。

传统的呼吸和反刍监测以人工观测为主。人工观察并计量胸脯起伏、咀嚼次数^[4-5],效率低下且无法长时间持续监测。随着信息技术和传感技术的迅速发展,自动化呼吸及反刍监测成为奶山羊智能化养殖领域的研究热点。现有的自动化奶山羊呼吸及反刍监测技术可分为接触式和非接触式两大类。接触式呼吸监测方法利用穿戴式设备(如压敏、气敏或热敏传感器等)测定胸脯部运动、呼吸声、呼吸气流等相关参数实现呼吸监测^[6-8];接触式反刍监测方法主要以加速度传感器、压力传感器测量下颚移动状态实现反刍监测^[9-12]。虽然上述方法可以实现呼吸和反刍的可靠监测,但需要在牲畜身体特定部位穿戴或植入传感器,干扰牲畜自然状态。此外,穿戴式设备易被刮蹭、啃咬、尿液浸泡而出现损坏,实施和维护成本较高。

现有的非接触式牲畜呼吸和反刍监测方法主要以视频图像^[13-18]、激光测距^[19]、热成像^[20]、声音识别^[21-26]等技术为基础构建。基于视频图像的方法虽能进行准确监测,但受可视角度限制,对被测牲畜的朝向敏感,当被测牲畜背对设备时系统无法监测呼吸和反刍。此外,基于视频的方法易受环境光线影响干扰。基于热成像的监测方法虽不受光线影响,但设备价格昂贵,难以推广应用。基于激光测距的方法由于受激光信号强指向性的影响对被测牲畜的朝向敏感。现有基于声音识别技术的方法,通过拾音器近距离采集牲畜呼吸过程中鼻腔发出的声音和反刍时上下颌撞击产生的声音,利用机器学习算法实现呼吸和反刍监测。此类方法依赖大量离线数据,对环境噪声敏感且距离分辨率不足。此外,上述几类方法都无法实现牲畜呼吸和反刍的同步监测。近年来研究人员尝试将超声用于人的非接触式呼吸监测^[27-28],并获得了良好的呼吸监测效果。与其它监测技术相比,基于超声的监测技术范围广、不受光线的影响,为奶山羊的呼吸及反刍监测提供了理论依据。

冲激响应^[29-30]作为衡量系统响应随时间变化

的工具,可以描述声学信号到达拾音器的延迟及衰减情况,具备良好的时间分辨特性。鉴于上述分析,本文提出一种基于声学冲激响应的静卧奶山羊呼吸及反刍同步监测方法。通过声学冲激响应捕捉呼吸和反刍引起的多径信号的变化,实现对单只静卧奶山羊朝向鲁棒的呼吸及反刍同步监测,以期为奶山羊患病个体及其它特殊个体的生理体征监测提供技术支撑。

1 声学信号捕获与数据采集

1.1 室内声学回波模型

声波信号本质上为机械波,无法穿透墙体和室内的其它物体,因此在室内存在丰富的声学多径反射效应。在圈舍养殖场景中布设扬声器和拾音器,扬声器与拾音器以类似雷达的方式同步工作。扬声器发出预设的超声信号,经过室内的一次或多次反射,最终被拾音器接收。将圈舍环境及被测羊只看作一个系统,利用收发信号估计系统声学冲激响应,刻画反射信号幅度及时延随时间的变化。奶山羊呼吸过程中的胸脯起伏和反刍过程中的嘴部咀嚼动作均为周期性运动,导致经过其反射的声波信号的幅度和延迟发生周期性变化。然而,拾音器接收到的信号不仅包含奶山羊呼吸及反刍运动的反射信号,还包含室内的其它反射信号,为了从众多反射信号中提取奶山羊呼吸及反刍运动的反射信号,本文构建了室内回波模型。如图 1 所示,拾音器接收的回波主要包括经过奶山羊胸脯部的反射信号(图中绿色箭头),经过奶山羊嘴部反射的信号(图中黄色箭头),经过奶山羊胸脯部及嘴部的反射信号(图中红色箭头),羊的其它部位反射信号(图中蓝色箭头),静态环境反射信号(图中紫色箭头),环境噪声(图中白色箭头)。

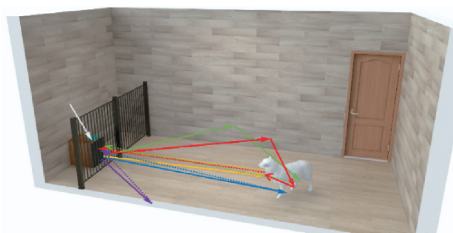


图 1 室内声学回波模型

Fig.1 Indoor acoustic echo model

综上,在室内环境中,拾音器所接收到的回波 $x_r(n)$ 可以表示为

$$x_r(n) = x_{bre}(n) + x_{cheu}(n) + x_{multi}(n) + x_{dyn}(n) + x_{sta}(n) + N(n) \tag{1}$$

式中 $x_{bre}(n)$ ——经过奶山羊胸脯部反射,最终被拾音器接收的信号,包括直接经

过奶山羊胸脯部反射信号 $x_{bre_dir}(n)$, 以及同时经过周围环境 (如墙壁、门、窗等) 和奶山羊胸脯部的反射信号 $x_{bre_indir}(n)$

$x_{chew}(n)$ ——经过奶山羊嘴部反射, 最终被拾音器接收的信号, 包括直接经过奶山羊嘴部反射信号 $x_{chew_dir}(n)$ 以及同时经过周围环境 (如墙壁、门、窗等) 和奶山羊嘴部的反射信号 $x_{chew_indir}(n)$

$x_{mult}(n)$ ——经过奶山羊胸脯部及嘴部的反射信号, 包括直接反射信号 $x_{mult_dir}(n)$ 和间接反射信号 $x_{mult_indir}(n)$

$x_{dyn}(n)$ ——经过奶山羊其它部位 (如耳部、腿部、尾部等) 一次或多次反射, 最终被拾音器接收到的回波信号

$x_{sta}(n)$ ——经过静态环境的一次或多次反射信号

$N(n)$ ——圈舍环境中的噪声

奶山羊在圈舍内处于静息状态的位置和朝向不固定, 当奶山羊背对设备或被遮挡时, $x_{bre}(n)$ 、 $x_{chew}(n)$ 和 $x_{mult}(n)$ 中不存在或存在很少的直接反射信号, 但由于室内环境中存在丰富的声学多径反射, 因此 $x_{bre_indir}(n)$ 、 $x_{chew_indir}(n)$ 和 $x_{mult_indir}(n)$ 一直存在。在实际圈舍环境中, 由于奶山羊胸脯部的面积远小于静态环境的反射面积, 因此 $x_{bre}(n)$ 、 $x_{chew}(n)$ 和 $x_{mult}(n)$ 中包含反射路径的数量和信号能量远小于 $x_{sta}(n)$ 中包含反射路径的数量和信号能量。但由于奶山羊呼吸过程中的胸脯起伏和反刍过程中的嘴部咀嚼动作均为周期性运动, 静态环境反射信号 $x_{sta}(n)$ 没有经过奶山羊的胸脯部及嘴部反射, 不包含奶山羊的运动信息, 因此可以通过周期性分析反射信号来提取 $x_{bre}(n)$ 、 $x_{chew}(n)$ 和 $x_{mult}(n)$ 。提取上述周期性变化的反射信号, 利用呼吸频率和反刍频率的差异^[31-32]实现呼吸信号和反刍信号的分离。

1.2 回波音频采集

于 2022 年 6—7 月在西北农林科技大学畜牧教学试验基地隔离圈舍 (3 m × 2.5 m × 2.9 m) 进行静卧奶山羊回波音频采集, 选取具备反刍能力的 7 只健康西农萨能奶山羊, 分别进行单独试验。为了避免羊只对环境改变产生的生理变化, 每只奶山羊都提前 3 d 在隔离圈舍内作环境适应性饲养。试验布置如图 2 所示, 在圈舍内布设声波多路同步收发平台, 声波收发平台由 4 个宽频扬声器和嵌有两个全向拾音器的声卡组成。声波收发平台通过 USB 接

口与便携式计算机相连, 呼吸及反刍监测算法在 Matlab 软件上运行。为了音频采集的效果及避免被羊只破坏, 声波收发平台放置在圈舍左侧, 在外放置保护栅栏。试验采集数据以音频帧的形式存储到硬盘中, 数据格式为 .mat, 帧率为 20 f/s。每段音频数据时长为 20 min。

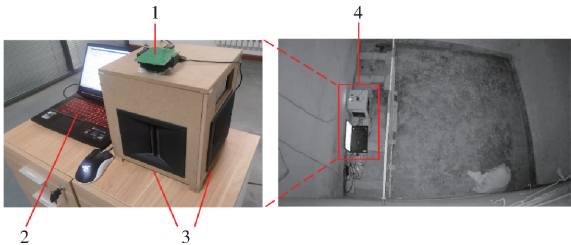


图 2 音频采集试验布置

Fig. 2 Audio acquisition test deployment

1. 声卡 2. 便携式计算机 3. 宽频扬声器 4. 声波多路同步收发平台

试验平台为一台 Windows 10 专业版系统的便携式计算机, 处理器配置为 Intel(R) Core(TM) i7-4720 HQ, 主频为 2.60 GHz, 内存为 8 GB, 算法开发平台版本为 Matlab 2020a。收发平台采样频率 f_s 为 96 kHz, 以频率变化连续的正弦调频连续波作为发射信号, 参数设置为: 载波频率 f_c 为 38 kHz, 扫频带宽 B 为 2 kHz, 扫频周期 T 为 0.02 s, 一个信号周期 T' 为 0.05 s。4 个扬声器的总功率为 50 W, 扬声器灵敏度为 94 dB。当 $f_c = 38$ kHz 时, 扬声器的波束宽度为 $\pm 14^\circ$, 拾音器的灵敏度、信噪比和总谐波畸变分别为 -26 dBFS、64.3 dB 和 0.2%。

1.3 音频选择

对采集到的圈舍内静卧奶山羊音频数据进行筛选, 去除掉奶山羊进食、未发生反刍行为、奶山羊活动等无效音频数据后, 共得到 7 段奶山羊试验音频。如表 1 所示, 试验中奶山羊相对声波收发平台朝向涉及正朝、侧朝和背朝 3 种方向, 且存在雨声、其它羊叫声、音乐声等噪声。7 段测试数据的时长、相对声波收发平台朝向均具有较大差异, 且存在其它干扰因素, 可用于验证本文方法的适用性。

表 1 静卧奶山羊音频信息

Tab. 1 Audio information of lying milk goat

音频编号	音频时长/ s	音频帧数	奶山羊相对 设备朝向	干扰因素
I	76	1 520	侧朝	无
II	47	940	侧朝	无
III	66	1 320	背朝	音乐声
IV	58	1 160	正朝	其它羊叫声
V	68	1 360	正朝	无
VI	59	1 180	背朝	无
VII	56	1 120	侧朝	雨声

2 奶山羊呼吸及反刍监测算法

算法主要由 3 部分组成：冲激响应序列估计，用于定量描述每一路多径信号的变化；呼吸及反刍信号分离，通过自相关函数度量冲激响应时序序列，根据呼吸频率和反刍频率的差异分离呼吸和反刍信号；呼吸及反刍波形可视化，将分离得到的呼吸和反刍信号，经幅度归一化、相位同步后，分别合成呼吸波形和反刍波形。算法整体方案如图 3 所示。

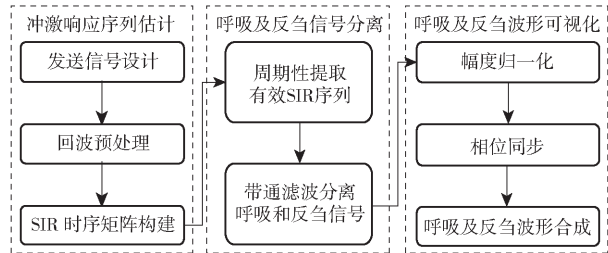


图 3 算法整体方案
Fig. 3 Overall scheme of algorithm

2.1 冲激响应序列估计

为了准确地估计圈舍环境中的系统冲激响应，确保冲激响应估计的准确性并避免对羊只造成干扰，需要设计合适的发送信号。本文采用载波频率大于 37 kHz(羊听觉范围上限)的连续调频波作为发送信号。由于常见的锯齿调频或者三角调频均存在频率突变点，发送信号存在频谱泄漏现象，导致扬声器发出的声波混杂有羊听觉范围内的噪声。本文选用频率变化连续的正弦调频构建发送信号。其瞬时频率可表示为

$$f(t) = f_c + \frac{B}{2} + \frac{B}{2} \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right) \quad (0 \leq t \leq T) \quad (2)$$

发送信号在时刻 t 的瞬时相位 $u(t)$ 可表示为

$$u(t) = \int_0^t f(t') dt' = 2\pi \left(f_c t + \frac{1}{2} B t - \frac{1}{4\pi} B T \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right) \right) \quad (0 \leq t \leq T) \quad (3)$$

发送信号表示为

$$x_s(t) = \cos(u(t)) = \cos\left(2\pi \left(f_c t + \frac{Bt}{2} - \frac{BT}{4\pi} \cos(2\pi t/T) \right) \right) \quad (0 \leq t \leq T) \quad (4)$$

为实现持续的呼吸及反刍监测，需要连续发送 $x_s(t)$ ，拾音器同步接收当前时刻反射回波。但直接发送 $x_s(t)$ 会导致回波信号存在混叠现象，即某一时刻拾音器接收到的数据为多次发送信号回波的叠加，不满足系统冲激响应估计的零状态要求，导致冲激响应的估计错误。为了使每次拾音器接收到的数

据为一次发送信号的完整回波，需要为发送信号加入一定的占空比，公式为

$$x_s(t) = \begin{cases} \cos(u(t))w(t) & (0 \leq t \leq T) \\ 0 & (T < t \leq T') \end{cases} \quad (5)$$

式中 $w(t)$ ——窗函数，用于缓解信号幅度突变导致的频谱泄漏

最终发送信号的离散形式为

$$x_s(n) = \begin{cases} \cos\left(2\pi \left(f_c nT_s + \frac{BnT_s}{2} - \frac{BT}{4\pi} \cos(2\pi nT_s/T) \right) \right) h(n) & (0 \leq nT_s \leq T) \\ 0 & (T < nT_s \leq T') \end{cases} \quad (6)$$

式中 T_s ——采样间隔

$h(n)$ ——圈舍声学冲激响应

为了避免接收回波出现混叠， $T' - T$ 应大于圈舍最大多径时延。通常圈舍空间越大，最大的多径时延也就越大。图 4a、4b 分别为发送信号的时域波形和时频域波形 ($f_s = 96 \text{ kHz}$, $f_c = 38 \text{ kHz}$, $B = 2 \text{ kHz}$, $T = 0.02 \text{ s}$, $T' = 0.05 \text{ s}$)。

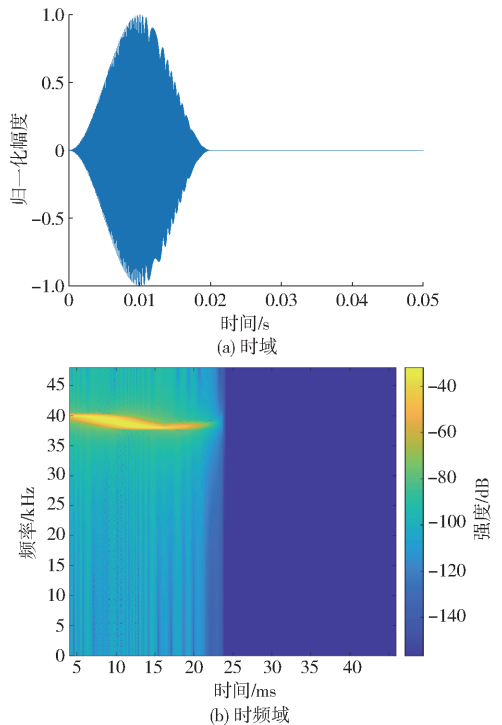


图 4 发送信号时域与时频域图
Fig. 4 Time domain and time-frequency domain diagram of transmitted signal

为了减少环境噪声干扰，收到的回波滤除发送扫频频段周围 500 Hz 频段的信号，以消除发送信号频带以外的噪声干扰。去除噪声后，拾音器接收到的回波模型为

$$x_r(n) = h(n) \otimes x_s(n) \quad (7)$$

根据卷积定理可得

$$H(n)=\frac{X_r(n)}{X_s(n)}\tag{8}$$

式中 $H(n)$ —— $h(n)$ 的傅里叶变换
 $X_r(n)$ —— $x_r(n)$ 的傅里叶变换
 $X_s(n)$ —— $x_s(n)$ 的傅里叶变换

实际应用中为屏蔽环境噪声,将 $\frac{1}{X_s(n)}$,即 $x_s(n)$ 逆滤波器的傅里叶变换替换为

$$C(n)=\frac{X_s^*(n)}{X_s^*(n)X_s(n)+\varepsilon(n)}\tag{9}$$

式中 $X_s^*(n)$ —— $X_s(n)$ 的傅里叶变换
 $\varepsilon(n)$ ——正则项,一般设计为在 $x_s(n)$ 的频段内取很小的值而在 $x_s(n)$ 频段外取较大的值以屏蔽环境噪声

最终冲激响应可估计为

$$\hat{h}(n)=\text{IFFT}(X_s(n)C(n))\tag{10}$$

以图 4 中所示例子为发送信号,图 5 为某圈舍内环境系统冲激响应的估计结果。横轴表示每个多径反射信号的时间延迟,纵轴表示多径信号幅度。

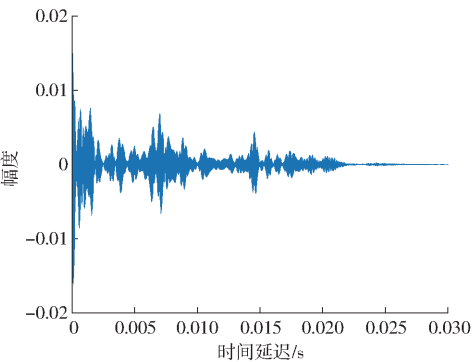


图 5 系统冲激响应序列时域图

Fig. 5 Time domain diagram of system impulse response

$\hat{h}(n)$ 描述当前时刻圈舍内的多径反射信号,若将 $\hat{h}(n)$ 随时间累积成时序矩阵,则可描述多径信号随时间的变化。为区别不同时刻的环境声学冲激响应,设 $\hat{h}_{t_i}(n)$ 表示 t_i 时刻的环境声学冲激响应,则环境声学冲激响应随时间累积形成的矩阵可表示为

$$S=\begin{bmatrix}\hat{h}_{t_1}\\\hat{h}_{t_2}\\\vdots\\\hat{h}_{t_M}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\hat{h}_{t_1}(1) & \hat{h}_{t_1}(2) & \cdots & \hat{h}_{t_1}(k)\\\hat{h}_{t_2}(1) & \hat{h}_{t_2}(2) & \cdots & \hat{h}_{t_2}(k)\\\vdots & \vdots & & \vdots\\\hat{h}_{t_M}(1) & \hat{h}_{t_M}(2) & \cdots & \hat{h}_{t_M}(k)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}S_1 & S_2 & \cdots & S_k\end{bmatrix}\tag{11}$$

式中 S_i ——时间延迟为 i/f_s 的多径信号的幅度变化序列

M ——分析窗口长度

由于声波收发设备不是严格的线性系统, S_i 会

随着时间的推移产生非线性趋势,因而要对 S_i 进行去趋势处理。

2.2 呼吸及反刍信号分离

呼吸过程中的胸脯起伏和反刍过程中的嘴部咀嚼动作均具有周期性,经过胸脯部及嘴部的直接或间接多径反射信号,均会出现周期性波动。因此,通过度量 S_i 的周期性即可实现直接和间接呼吸及反刍动作反射信号的提取。

自相关函数是进行周期性度量的良好工具, S_i 的自相关函数定义为

$$R(n)=\frac{c_n}{c_0}\quad(n=0,1,\cdots,M-1)\tag{12}$$

$$\text{其中 } c_n=\frac{1}{M}\sum_{j=1}^{M-n}(S_i(j)-\bar{S}_i)(S_i(j+n)-\bar{S}_i)\tag{13}$$

式中 c_n —— S_i 的自协方差

图 6a 给出了 4 个不同的 S_i ,分别表示:仅经过胸部和静态环境反射的多径信号(黑色);仅经过嘴部和静态环境反射的多径信号(红色);同时经过嘴部、胸部及静态环境反射的多径信号(蓝色);未经过胸部及嘴部反射的多径信号(黄色)。可以看到仅经过胸部、仅经过嘴部和同时经过嘴部和胸脯反射的多径信号均具有一定的周期性,而未经过嘴部和胸部反射的信号无周期性。图 6b 为上述 4 个 S_i 的自相关函数值。可以看到,有周期性的 S_i 的自相关函数呈现出多个明显的峰值且峰值之间间隔均匀。假设某一时刻 S_i 序列的自相关函数前 i 个峰值的幅度为 $peak_i$,对应的峰值索引位置为 $l_i,0\leq i\leq m$,令自相关函数峰值间隔 $l_{inr}=l_{i+1}-l_i$,因此,基于自相关函数的挑选周期性 S_i 的规则可定义为

$$peak_{\max}>PeakheightThrd$$

$$\max(l_{inr})-\min(l_{inr})<\frac{PeriodThrd\times MidD}{T'}$$

其中, $peak_{\max}$ 表示自相关函数峰值的最大值; $PeakheightThrd$ 表示自相关函数峰值幅值的阈值; $PeriodThrd$ 表示自相关函数周期的阈值; $MidD$ 表示奶山羊完成一次反刍的平均时间。

基于上述规则即可提取出所有包含呼吸和反刍信息的 S_i 。

基于自相关函数提取出来的周期性 S_i 可能同时包含呼吸和反刍信息(如图 6a 中蓝曲线所示)。由于奶山羊呼吸频率和反刍频率差异明显,因此可以通过构建带通滤波器组分离呼吸和反刍信号。为了适应不同羊只的呼吸和反刍频率,首先计算所有周期性 S_i 的幅度谱,如图 7 所示,根据幅度谱峰值确定带通滤波器的截止频率,然后使用构造的带通滤波器进行滤波。图 8 展示了图 6a 中同时包含呼

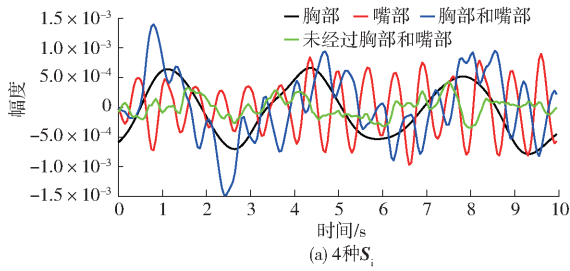


图 6 序列与自相关函数值

Fig. 6 Sequence and autocorrelation function value

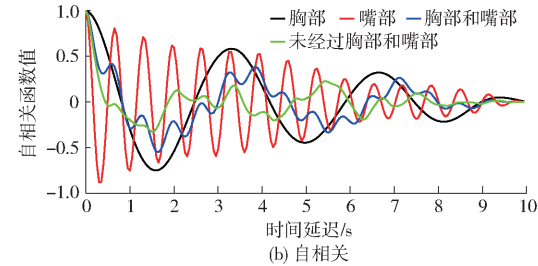


图 7 序列幅度谱

Fig. 7 Amplitude spectrum of sequence

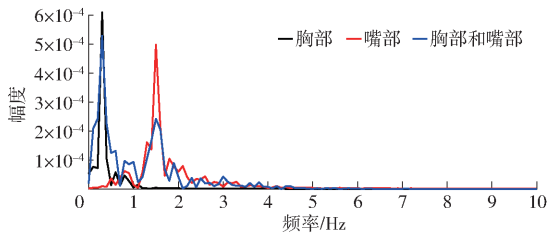


图 8 滤波前后序列

Fig. 8 Sequence before and after filtering

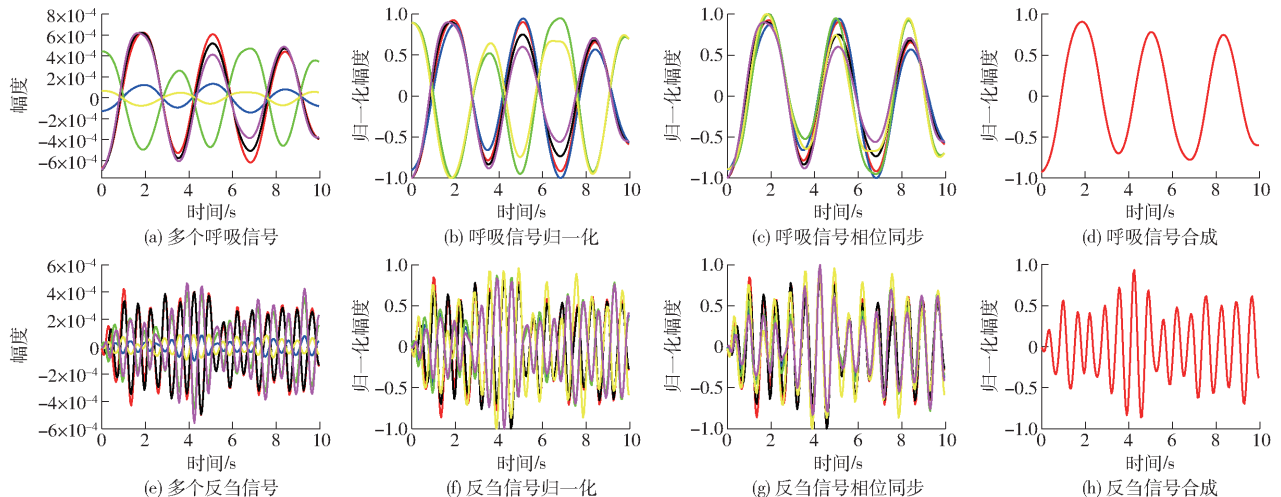
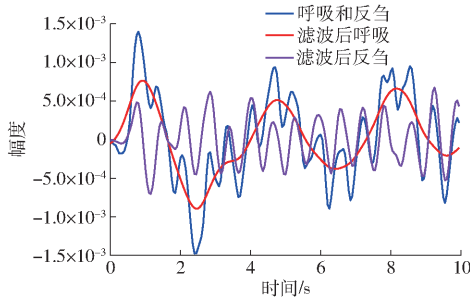


图 9 波形合成

Fig. 9 Synthesis of movement waveform

吸和反刍信息的 S_i 经过带通滤波器组分离得到的呼吸波和反刍波。

2.3 呼吸及反刍运动波形可视化

从多个不同的周期性 S_i 可以分离出多路呼吸信号和多路反刍信号。融合多路呼吸信号(反刍信号)即可得到呼吸波(反刍波)。由于不同的多径信号有不同的幅度和反射路径,从不同的周期性 S_i 分离得到的多个呼吸信号(反刍信号)幅度不同且可能出现相位差为 π 的现象。图 9a 和图 9e 分别为从不同周期性 S_i 分离得到的多个呼吸信号和多个反刍信号。直接将这些呼吸信号(反刍信号)叠加会使幅度较小的信号被淹没,相位相反的信号相互抵消。为解决上述问题,首先将所有呼吸信号(反刍信号)进行幅度归一化,然后对相位进行同步,最后进行叠加平均(详见算法 1)。图 9b 和图 9f 分别为归一化后的多个呼吸信号和多个反刍信号,图 9c 和图 9g 分别为相位同步后的多个呼吸信号和多个反刍信号,图 9d 和图 9h 为最终合成的该时刻的呼吸信号和反刍信号。

算法 1:呼吸和反刍波形合成算法

输入:当前时刻分离出来的呼吸信号集合 $S_b = \{s_b^{(1)}, s_b^{(2)}, \dots, s_b^{(N)}\}$ 及反刍信号集合 $S_c = \{s_c^{(1)}, s_c^{(2)}, \dots, s_c^{(N)}\}$, 上一时刻合成的呼吸波 Wb_{last} 及反刍波 Wc_{last} 。

输出:当前时刻合成的呼吸波 Wb_{curr} 及反刍波 Wc_{curr} 。

$Bw_{curr} \leftarrow \text{Synthesizer}(S_b, Wb_{last})$;

$Cw_{curr} \leftarrow \text{Synthesizer}(S_c, Wc_{last})$;

Procedure Synthesizer(S, W)

$S_{norm}^i = S^i \parallel S^i \parallel_1$; // S^i 表示第 i 个呼吸(反刍)信号

$W_{curr} \leftarrow (S_{norm}^1) / \|S_{norm}^1\|_1$;

for i from 2 to N do

```
if  $\|W_{curr} + S_{norm}^i\|_1 < \|W_{curr} - S_{norm}^i\|_1$  // 当前时刻波  
行相位校正  
     $W_{curr} \leftarrow W_{curr} - S_{norm}^i$   
else  
     $W_{curr} \leftarrow W_{curr} + S_{norm}^i$   
end if  
end for  
 $W_{curr} \leftarrow W_{curr} / N$  // 对合成的波形的幅度进行求和平均处理  
if  $\|W_{last} + W_{curr}\|_1 < \|W_{last} - W_{curr}\|_1$  do // 与前一  
时刻相位校正  
     $W_{curr} \leftarrow -W_{curr}$   
end if
```

算法首先将当前呼吸(反刍)波初始化为归一化后的第一个呼吸(反刍)信号。然后逐个检查其它呼吸(反刍)信号,若与当前呼吸(反刍)波相位相近则将其直接叠加到当前呼吸(反刍)波,否则沿时间轴反转后叠加到当前呼吸(反刍)波。然后对当前呼吸(反刍)波做平均处理。最后参考上一时刻的呼吸(反刍)波对当前呼吸(反刍)波相位进行校正,确保前后两次合成的呼吸波相位连续。

3 试验结果与分析

3.1 不同个体奶山羊呼吸及反刍监测结果分析

表 1 中 7 段音频数据采集时奶山羊的位置、对应的某一帧呼吸及反刍波形如图 10 所示。可以看到即使被测羊只背对着声波收发设备,系统仍能监测到奶山羊的呼吸及反刍运动。

采用本文呼吸及反刍监测方法对 7 段音频数据进行验证,结果如表 2 所示。表 2 中呼吸和反刍次数的真实值由人工观察得到;呼吸和反刍次数的计算值由监测结果的波形数得到。通过定义相对误差,可以评估系统计算值的可信度。漏帧率为漏帧数与总帧数的比值。由表 2 可知,由监测算法计算的呼吸及反刍次数与真实值相比,具有较高的一致性,其中呼吸平均相对误差为 2.60%,呼吸最大相对误差为 6.67%,反刍平均相对误差为 3.51%,反刍最大相对误差为 4.76%,平均漏帧率为 2.49%。综上结果表明,本文方法能同步监测奶山羊的呼吸及反刍行为,对静卧奶山羊具有较高的跟踪精度。

从表 2 中可以看出,不同奶山羊的呼吸频率和反刍频率具有差异。以表 1 中第 VI、V 段的音频数据(对应图 10 第 VI、V 号奶山羊)为例,呼吸及

反刍追踪结果绘制的时间-频率曲线如图 11 所示。通过观察该曲线可以发现,即使在奶山羊呼吸频率及反刍频率相差较大时,系统仍能稳定追踪。

3.2 奶山羊朝向对监测结果的影响

奶山羊不同朝向下的统计结果如表 3 所示,从表 3 中可以看出,奶山羊侧朝声波收发设备与正朝设备的监测结果没有明显差别。Ⅲ、Ⅵ号羊背对声波收发设备时漏帧率略有上升,平均漏帧率为 5.05%。但相较于其它朝向,Ⅲ、Ⅵ号羊呼吸平均相对误差为 3.34%,反刍平均相对误差为 3.21%,没有明显的呼吸和反刍相对误差偏差,满足实际圈舍环境下监测的需求。这是因为室内环境中存在丰富的声学多径反射效应,如 1.1 节中所述,即使被测羊只背朝声波收发设备,拾音器也总能接收到经过被测羊只胸脯部和嘴部间接反射的声波信号,因此系统对被测羊只的朝向具有较强的鲁棒性。

漏帧率略有上升的推断原因是,当奶山羊背对着声波收发设备时,拾音器在某一帧时刻下收到的回波中,包含呼吸和反刍运动的有效多径信号较少,导致挑选不出符合规则的 S_i 。

3.3 环境噪声对监测结果的影响

与无干扰环境中的羊只相比,环境中存在其它羊叫声干扰的Ⅵ号羊、音乐声干扰的Ⅲ号羊和雨声干扰的Ⅶ号羊,呼吸反刍监测漏帧率及呼吸反刍相对误差并无明显差别,如表 4 所示。

原因有两方面。首先,与动物声音特征分析的方法不同,本文是通过雷达原理,测量羊只呼吸和反刍过程中胸部及嘴部的周期性运动,完全不依赖于羊只自身发出的任何声音。扬声器发送特定声波信号,声波信号经过静态环境及被测羊只发生一次或多次反射,最终被拾音器收到。另一方面,由于发送的超声波频段为 38~40 kHz,远超普通噪声频段,再结合通带为 38~40 kHz 的带通滤波器可以很好地在接收端屏蔽外界环境噪声。因此系统对环境噪声的抗干扰能力较强。

4 结论

(1)该方法可实现对单只静卧奶山羊呼吸及反刍行为的同步监测。同时该方法对不同朝向的奶山羊鲁棒,对环境噪声具有较强的抗干扰能力。表明利用声学冲激响应实现奶山羊呼吸及反刍的同步监测是可行的。

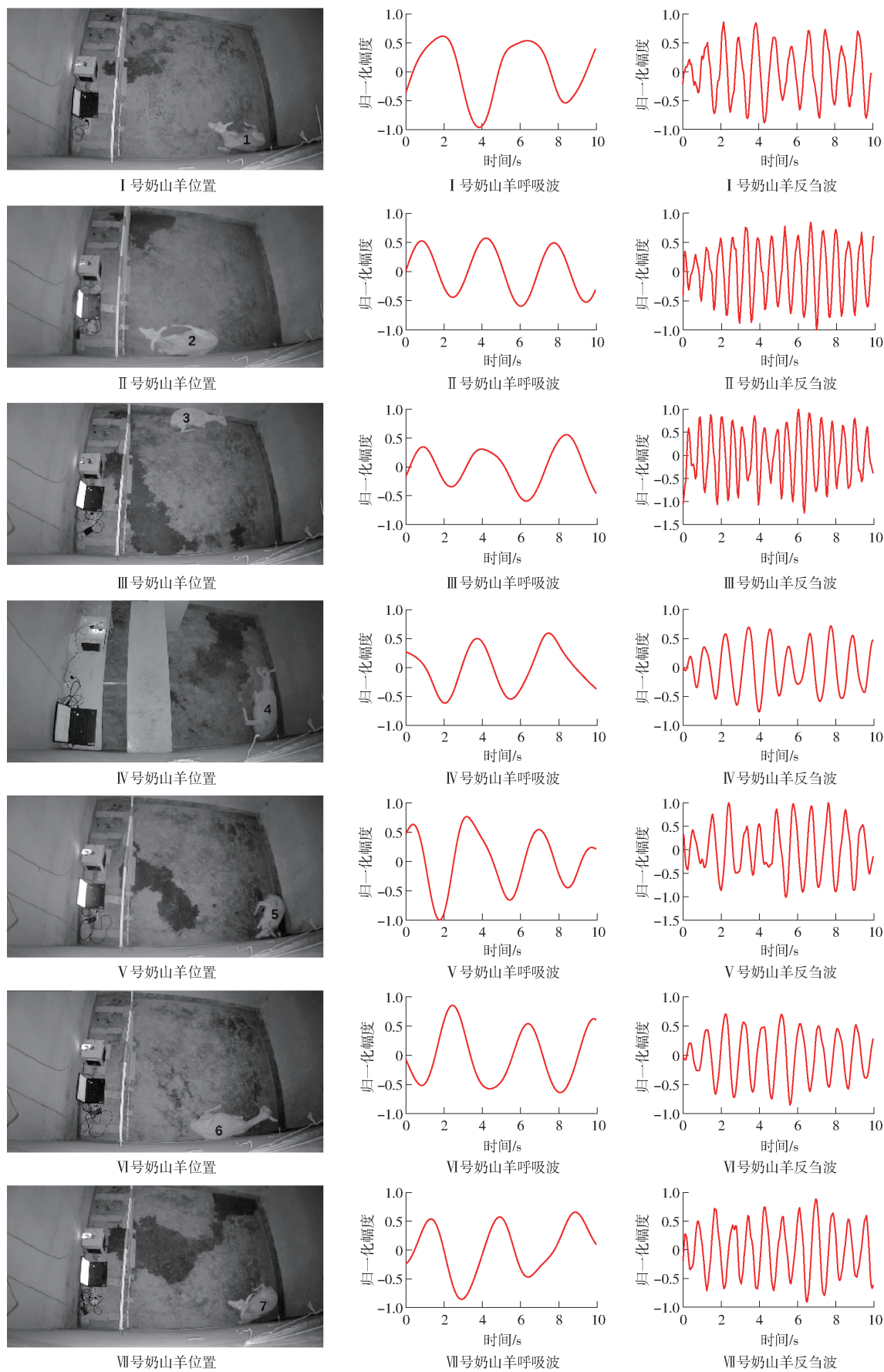


图 10 静卧奶山羊呼吸及反刍监测结果

Fig. 10 Monitoring results of respiration and rumination of lying dairy goats

表 2 静卧奶山羊呼吸次数、反刍次数、相对误差和漏帧率

Tab.2 Respiration times, rumination times, relative error and frame leakage rate of lying dairy goats						
编号	呼吸次数		呼吸相	反刍次数		反刍相
	真实	计算	对误	真实	计算	对误
	值	值	差/%	值	值	差/%
I	19	19	0	86	84	2.33
II	14	14	0	63	66	4.76
III	18	18	0	107	112	4.67
IV	16	15	6.25	50	52	4.00
V	19	20	5.26	77	80	3.90
VI	15	16	6.67	57	58	1.74
VII	14	14	0	63	65	3.17
平均值			2.60			3.51
						2.49

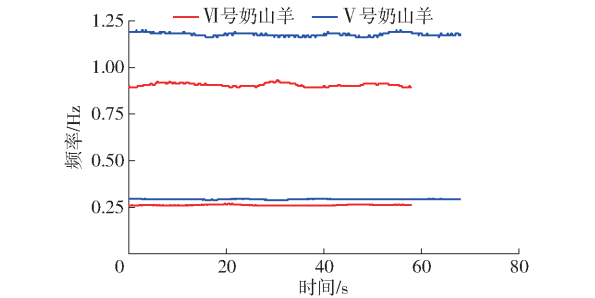


图 11 V、VI号奶山羊时间-频率曲线

Fig. 11 Time – frequency curves of milk goats V and VI

表 3 静卧奶山羊不同朝向下的相对误差和漏帧率
Tab.3 Relative error and frame leakage rate in different orientations of lying milk goats

奶山羊相对设备朝向	呼吸相对误差	反刍相对误差	漏帧率
正朝	5.76	3.95	1.09
侧朝	0	3.42	1.72
背朝	3.34	3.21	5.05

表 4 静卧奶山羊不同噪声下的相对误差和漏帧率
Tab.4 Relative error and frame leakage rate of lying milk goats under noise interference

奶山羊相对设备朝向	奶山羊噪声种类	呼吸相对误差	反刍相对误差	漏帧率
正朝	无	5.26	3.90	1.26
正朝	其它羊叫声	6.25	4.00	0.91
侧朝	无	0	3.55	1.50
侧朝	雨声	0	3.17	2.17
背朝	无	6.67	1.74	5.83
背朝	音乐声	0	4.67	4.27

(2)该方法能准确地对静卧奶山羊的呼吸及反刍行为进行监测。其中,呼吸平均相对误差为 2.60%,反刍平均相对误差为 3.51%,平均漏帧率为 2.49%。

参 考 文 献

[1] 杜占凤. 羊乳制品领跑细分品类市场潜力被快速挖掘[J]. 乳品与人类, 2021(3): 4 – 11.

[2] 林志峰,张晗妍,张浩,等. 论新形势下规模化奶山羊场的疫病防控与健康养殖[J]. 畜牧兽医杂志,2019,38(4):74 – 77,80.

LIN Zhifeng, ZHANG Hanyan, ZHANG Hao, et al. To discuss the prevention and control of disease and health care of large-scale milk goat farm under the new situation[J]. Journal of Animal Science and Veterinary Medicine, 2019, 38(4): 74 – 77, 80. (in Chinese)

[3] 孙建锋,牛建宁,韩志伟. 引进奶山羊发生传染性胸膜肺炎病的综合防治[J]. 畜牧兽医杂志,2014,33(4):123 – 126.

[4] 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): 6.

LI Qifeng, DING Luyu, LI Jie, et al. Automatic measurement methods for respiration rate of cattle; a review[J]. Chinese Journal of Animal Science, 2019, 55(10): 6. (in Chinese)

[5] 沈维政,张爱静,张宇. 奶牛反刍研究进展[C]//中国畜牧兽医学会信息技术分会第十二届学术研讨会, 2017: 55 – 64.

[6] EIGENBERG R, HAHN G, NIENABER J, et al. Development of a new respiration rate monitor for cattle[J]. Transactions of the ASAE, 2000, 43(3): 723 – 728.

[7] STRUTZKE S, FISKE D, HOFFMANN G, et al. Development of a noninvasive respiration rate sensor for cattle[J]. Journal of Dairy Science, 2018, 102(1): 690 – 695.

[8] MILAN H, MAIA A, 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.

[9] 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, 2019, 7(3): 427 – 443.

[10] IQBAL M W, DRAGANOVA I, MOREL P C, et al. Validation of an accelerometer sensor-based collar for monitoring grazing and rumination behaviours in grazing dairy cows[J]. Animals, 2021, 11(9): 2724.

[11] BRAUN U, TRÖSCH L, NYDEGGER F, et al. Evaluation of eating and rumination behaviour in cows using a noseband pressure sensor[J]. BMC Veterinary Research, 2013, 9(1): 1 – 8.

[12] 张春慧,宣传忠,于文波,等. 基于三轴加速度传感器的放牧羊只牧食行为研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 307 – 313.

ZHANG Chunhui, XUAN Chuanzhong, YU Wenbo, et al. Grazing behavior of herding sheep based on three-axis acceleration sensor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 307 – 313. (in Chinese)

- [13] 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)
- [14] 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(5): 194–202.
- [15] 宋怀波,牛满堂,姬存慧,等. 基于视频分析的多目标奶牛反刍行为监测[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18): 211–218.
SONG Huaibo, NIU Mantang, JI Cunhui, et al. Monitoring of multi-target cow ruminant behavior based on video analysis technology[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18): 211–218. (in Chinese)
- [16] 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)
- [17] 陆明洲,梁钊董,NORTON Tomas,等. 基于 EfficientDet 网络的湖羊短时咀嚼行为识别方法[J]. 农业机械学报, 2021, 52(8): 248–254, 426.
LU Mingzhou, LIANG Zhaodong, NORTON Tomas, et al. Automatic identification method of short-term chewing behaviour for sheep based on EfficientDet network[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 248–254, 426. (in Chinese)
- [18] 姬江涛,刘启航,高荣华,等. 基于改进 FlowNet 2.0 光流算法的奶牛反刍行为分析方法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(1): 235–242.
JI Jiangtao, LIU Qihang, GAO Ronghua, et al. Ruminant behavior analysis method of dairy cows with improved FlowNet 2.0 optical flow algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 235–242. (in Chinese)
- [19] PASTELL M, KAIHILAHTI J, AISLA A M, et al. A system for contact-free measurement of respiration rate of dairy cows[C]//3rd European Conference on Precision Livestock Farming (ECLPF). Wageningen, the Netherlands: Wageningen Academic Publishers, 2007: 105–109.
- [20] JORQUERA-CHAVEZ M, FUENTES S, DUNSHEA F R, et al. Modelling and validation of computer vision techniques to assess heart rate, eye temperature, earbase temperature and respiration rate in cattle[J]. Animals, 2019, 9(12): 1089.
- [21] CARVALHO G, SALMAN A, CRUZ P, et al. An acoustic method for assessing the respiration rate of free-grazing dairy cattle [J]. Livestock Science, 2020, 241(5): 104270.
- [22] CHELOTTI J O, VANRELL S R, RAU L, et al. An online method for estimating grazing and rumination bouts using acoustic signals in grazing cattle[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 173: 105443.
- [23] CLAPHAM W M, FEDDERS J M, BEEMAN K, et al. Acoustic monitoring system to quantify ingestive behavior of free-grazing cattle[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 76(1): 96–104.
- [24] DUAN G, ZHANG S, LU M, et al. Short-term feeding behaviour sound classification method for sheep using LSTM networks [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2021, 14(2): 43–54.
- [25] MILONE D H, GALLI J R, CANGIANO C A, et al. Automatic recognition of ingestive sounds of cattle based on hidden Markov models[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 87: 51–55.
- [26] WANG K, WU P, CUI H, et al. Identification and classification for sheep foraging behavior based on acoustic signal and deep learning[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 187: 106275.
- [27] WANG T, ZHANG D, WANG L, et al. Contactless respiration monitoring using ultrasound signal with off-the-shelf audio devices[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 6(2): 2959–2973.
- [28] WANG T, ZHANG D, ZHENG Y, et al. C – FMCW based contactless respiration detection using acoustic signal [C]// Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies, 2018: 1–20.
- [29] FARINA A. Advancements in impulse response measurements by sine sweeps[J]. Audio Engineering Society Convention, 2007, 114(4): 2400.
- [30] STAN G B, EMBRECHTS J J, ARCHAMBEAU D. Comparison of different impulse response measurement techniques[J]. Journal of the Audio Engineering Society, 2002, 50(4): 249–262.
- [31] 徐刚毅,刘相模,张礼琪,等. 英国萨能羊、纽宾羊和雅安奶山羊生理指标的测定及比较[J]. 四川农业大学学报, 1989 (3): 169–171.
XU Gangyi, LIU Xiangmo, ZHANG Liqi, et al. Measure and comparison of the physiological indices of the British Saanen, Anglo-Nubian and Yaan dairy goats[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 1989(3): 169–171. (in Chinese)
- [32] KASKE M, BEYERBACH M, HAILU Y, et al. The assessment of the frequency of chews during rumination enables an estimation of rumination activity in hay-fed sheep[J]. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition, 2002, 86(3–4): 83–89.