

哺乳母猪高危动作识别方法研究

闫丽^{1,2} 沈明霞¹ 谢秋菊² 刘龙申¹ 陆明洲¹ 刘桂阳²

(1. 南京农业大学工学院, 南京 210031; 2. 黑龙江八一农垦大学信息技术学院, 大庆 163319)

摘要: 哺乳母猪从站立、坐立转为趴卧的高危动作是导致断奶前仔猪死亡的主要原因, 动作发生频率及变换方式决定了母猪的母性指数。以江苏省农林职业技术学院小梅山原种猪场饲养的小梅山母猪为研究对象, 利用 MPU6050 传感器采集母猪哺乳期内 10 d 的三轴加速度数据, 采用直方图统计法设置运动能量阈值, 快速定位高危动作区间, 以高危动作发生前后的身体姿态为特征, 构建动作分类器, 识别高危动作的类型。实验结果表明, 对高危动作区间的标注准确率为 77.4%, 基于姿态的动作类型识别方法纠正了因仔猪碰撞节点产生的误标, 识别准确率达到 81.7%。利用 2 种俯卧姿态计算母猪的俯卧指数可为实现母性能力科学评价及育种提供数据依据。

关键词: 哺乳母猪; 高危动作; 识别; 运动能量; 直方图统计; 母性指数

中图分类号: S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)01-0266-07

Research on Recognition Method of Lactating Sows' Dangerous Body Movement

Yan Li^{1,2} Shen Mingxia¹ Xie Qiuju² Liu Longshen¹ Lu Mingzhou¹ Liu Guiyang²

(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

2. College of Information and Technology, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

Abstract: The dangerous body movements (DBM) of lactating sows, such as the change from standing, sitting to lying, is a major cause for the death of pre-weaning piglets. Although, the utilities of farrowing crate and anti-crushing rail will effectively reduce the mortality caused by the DBM of lactating sows, there are still significant differences for the mortality of piglets in the same breeding environment, therefore, the difference maternal ability of individual sow will play an important role. The maternal index of sow was determined by the changing frequencies and types of these DBM. Five lactating sows of Xiao Meishan which were bred in the farm of Jiangsu Polytechnic College of Agriculture and Forestry were used in this study. Firstly, a set of monitoring node with MPU6050 and bluetooth module was tighten on the neck of a sow to collect the three-axis acceleration data during 10 d. Then, the histogram method was used to compute the threshold of the kinetic energy in order to locate the area of a DBM quickly. Finally, a classifier to identify the type of the DBM was built according to the characteristics of the body postures occurred in pre- or pro-DBM. The results showed that the accuracy of for marking DBM area for 327 samples was 77.4%, while the accuracy of DBM recognition was 81.7%. The main reason for the different accuracy mentioned above is that the errors caused by piglet crashing the node were corrected by the recognition algorithm of posture. Thus, the bend index of a lactating sow can be calculated further more and the data basis for the scientific evaluation of maternal ability in the breeding sow will be provided.

Key words: lactating sow; dangerous body movement; recognition; kinetic energy; histogram statistic; maternal index

收稿日期: 2015-07-02 修回日期: 2015-09-18

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项资金项目(201003011)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(KYZ201561)、黑龙江省青年科学基金项目(QC2014C078、QC2013C065)、江苏省产学研合作前瞻性联合创新资金项目(BY2015071-06)和黑龙江农垦总局“十二五”重点科技计划项目(HNK125B-04-06)

作者简介: 闫丽(1979—),女,博士生,黑龙江八一农垦大学讲师,主要从事设施养殖研究,E-mail: bynd_yanli@163.com

通信作者: 沈明霞(1964—),女,教授,博士生导师,主要从事机器视觉和信息农业研究,E-mail: mingxia@njau.edu.cn

引言

2000年,美国农业部国家动物健康监测系统(National animal health monitoring system, NAHMS)的相关数据显示仔猪断奶前的死亡率为11%,其中母猪踩、压致死率达到52.1%^[1];2013年,丹麦养猪研究中心(Danish pig research center, VSP)对9个农场的统计数据显示断奶前仔猪的平均死亡率为13%,而挤压致死率占其中的15%~51%^[2]。仔猪被压的危险常发生在母猪身体特定动作出现的时刻,包括身体从站立、坐立转为趴卧及翻滚动作,将这些动作统称为高危动作(Dangerous body movement)^[3]。产仔限位栏^[4]和防仔猪挤压装置^[5]的使用,改善提高了仔猪的环境条件,有效降低了母猪高危动作对仔猪造成的损伤。然而,相同环境下,新生仔猪死亡率仍有显著差异,因此母猪母性行为差别是仔猪死亡率不同的最重要因素^[6-7]。研究表明,不同品种、不同个体之间母性行为差异受遗传因素控制^[8],母猪高危动作发生频率与其PRLR基因的SNP位点相关^[9]。对哺乳期母猪进行智能行为监测^[10-11],自动标记出高危动作类型,评价俯卧的小心程度,找寻高危动作发生次数少、母性评分等级高的母猪作为育种母猪,有助于从遗传育种角度提高母猪的母性行为等级,降低断奶前仔猪的死亡率。

加速度传感器具有体积小、功耗低、灵敏度高的特点,易于集成到手机、手表或自主开发小型设备中,便于佩戴在人及大型家畜身体上,采集个体的行为数据,实现对运动状态(或活动)的识别。目前,人体运动模式识别已应用于人机交互^[12]、健康监测^[13]、手持设备的上下文感知^[14]和运动能量消耗计量^[15]等领域。但对于动物运动模式的研究,受捆绑方式的限制尚处在起步阶段:将传感器捆绑在大型家畜的腿或颈部,利用聚类方法划分运动幅度,核算成运动量来预测母畜的发情^[16]和分娩^[17];改用皮带固定,实现对家畜的趴卧、站立、行走与采食4种行为,及立、侧、侧倾3种姿态的识别^[11,18-19]。

本文利用现有的行为监测设备采集5头母猪哺乳期10d的行为数据,分析母猪静止、运动及俯身动作的运动能量特征,通过直方图统计法设置阈值,实现对母猪5种典型的高危动作识别,并进一步建立母猪母性评价中高危动作的评分标准。

1 高危动作的特征

1.1 姿态和动作

姿态(Posture)是身体呈现的样子,参照对人的运动学分类^[20],从高度角度上讲,母猪的姿态分

为3种,即站立(Standing, ST)、坐立(Sitting, SI)和趴卧(Lying, LY);按身体平面与地面的倾斜角度分类,又分为立卧姿(Lying sternally, LS)和侧卧姿(Lying laterally, LL)2种。参考文献[18]将三轴加速度计固定于颈部,定义 x 、 y 、 z 分别指向垂直向上、身体右侧和母猪头部,符合右手坐标系。用颈部一点的运动反映全身的运动确有不足之处,但在集约化程度高的猪场,母猪哺乳阶段多在产床的限位栏内完成,空间狭小,限制了母猪的转身、翻身等正常行为表达,只表现出坐、站立、立卧和侧卧4种有限姿态。其颈部是头部与躯干之间的衔接部位,由寰椎和枢椎组成,颈部运动相对于头部运动敏感,然而猪的脂肪层过厚导致连接的皮肤紧致,限制了猪头部的转动范围,因此在有限姿态下,将颈部运动近似视为其身躯的运动,则各种姿态的数值特征如表1所示。趴卧姿属于静止方式的一种,与其他姿态比较,三轴加速度数据更平稳,波动性较小,在重力作用下,侧卧姿时 y 轴处于垂直方向,数值大小接近 $\pm g$ ($g = 9.8 \text{ m}^2/\text{s}$),立卧姿 x 轴指向重力相反方向,数值近于 $-g$,其它轴数据在零附近波动;立卧与站立的姿态特征相似,但数据的运动幅度不同,可加以区分;坐立时,母猪身体与水平面呈现一定夹角 β ,根据母猪间差异,依据身长 h 与前腿高度 l ,则有

$$\beta = \arcsin\left(\frac{l}{h}\right) \quad (1)$$

其中, β 通过加速度传感器MPU6050的抬头角计算获得^[18],此时, x 轴与重力的夹角为 $180^\circ - \beta$, z 轴与重力夹角等于 $90^\circ + \beta$,实现坐立姿态的识别。

表1 各种姿态的数值特征

Tab. 1 Data characteristics of pose

姿态	姿态特征	运动幅度	运动幅度特征
侧卧	左侧卧: y 接近 g , x 、 z 接近0	静止	各轴数据相对平稳,波动性不明显
	右侧卧: y 接近 $-g$, x 、 z 接近0		
立卧	x 为 $-g$,其它值接近0		
坐立	x 为 $-g\cos\beta$, z 等于 $-g\sin\beta$		各轴数据有轻微或剧烈波动,其中坐立时,身体呈现一定倾角 β
站立	x 值接近 $-g$,其它在0附近波动	运动	

动作(Activity)是通过姿态改变实现的,但动作不是对姿态简单的、机械的组合,而是复杂程度不同的、完整的、有目的的运动系统,哺乳母猪常见的动作有起身、俯身、翻转等。

1.2 高危动作

受到产仔限位栏空间限制,哺乳母猪几乎没有翻滚动作的发生,但母猪高度姿态间两两变换对应

着6种排列方式,即站立↔坐立、站立↔趴卧、坐立↔趴卧,其中自高向低的俯身动作则是导致仔猪被压的主要动作^[3]。依据运动分类规则,姿态改变同时引起运动能量的变化,因此,能量的计算是判断高危动作的重要依据之一。然而,母猪从低到高的起身动作及趴卧姿态的调整也会引起运动能量上的显著变化,如何去除这些干扰动作是本文需要解决的首要问题;其次,俯身过程中突然侧卧更容易压到仔猪^[21],这一改变过程会附加明显的立姿→侧卧姿的姿态改变。

2 方法

2.1 加速度数据分解

三轴加速度数据是按时间序列排列的一系列传感数据,各轴加速度函数表示为

$$A(t) = \{a_k(t)\} \quad (\forall k = x, y, z) \quad (2)$$

其中 a_k 表示三轴加速度传感器采集的 k 轴行为数据,利用小波变换分解出低频的姿态函数 b_k 和高频的动作幅度函数 m_k 。根据文献[19]中侧卧(L1, L2)、立卧(LS)及坐、站立等小幅运动(MA)的定义,姿态加速度的取值为 $[-1, 1]$,具有较明显的矩形边缘。Haar小波具有正交、对称、紧支撑的特性,且表现为 $t \in [0, 1]$ 的单个矩形波与目标数据结构相似,选择Haar为基本小波,分解层数取决于采样频率和有用成分。节点采样频率为0.1 Hz,其中基本轮廓主频出现在0~0.003 Hz,运动频率主要集中在0.003~0.1 Hz,设分解层数为5,利用小波系数 a_5 构造姿态函数 b_k 、细节系数 $d_1 \sim d_5$ 重构动作幅度函数 m_k ,则

$$a_k(t) = b_k(t) + m_k(t) \quad (\forall k = x, y, z) \quad (3)$$

2.2 基于运动能量的高危动作标识方法

(1) 运动能量的计算

运动能量 $E(t)$ 是频率0.003~0.1 Hz运动幅度分量的平方和,具有时频特性,同时起到了降维的作用,则

$$E(t) = \sum_k w_k m_k^2(t) \quad (\forall t = 1, 2, \dots, n; k = x, y, z) \quad (4)$$

式中, w_k 为各轴能量的权值,令 $\sum_k w_k = 100$,其中 w_k 的选择依据不同的需求,若侧重于活动量的计算,则提高垂直方向 x 轴的权值;如若侧重于对体位姿的区分,则提高水平左右方向 y 轴的取值;本文中,对位姿、运动量的考量同等重要,略高于表示水平前后方向的 z 轴权值,根据经验设 $w_x = 40, w_y = 40, w_z = 20$ 。

(2) 静止/运动区域划分

根据运动能量的大小,信号被分为静止区域 S 和运动区域 M 。设运动阈值 σ ,当 $E(t) \geq \sigma$,对应的加速度 $A(t)$ 标记为一个运动点;反之,是一个静止点。时间窗大小选取10,间隔为5,将相邻窗内出现的2个及以上运动点合并成一个运动区域。

(3) 高能运动点

运动区域中的高能运动点往往对应着一个加速度显著变化的动作,例如起身、俯身、爬跨、翻身等,则有

$$A(t) \in \begin{cases} H & (E(t) \geq \theta) \\ L & (E(t) < \theta) \end{cases} \quad (5)$$

式中 L ——轻幅运动集合

H ——大幅运动集合 θ ——高能阈值

(4) 高危动作

母猪起身、运动、再俯身休息是一个连续的、动态的过程,对应着一个完整运动区域。俯身动作 D 往往是一个运动区域内出现的最后一个高能运动点为中心的姿态变换区间,其中 D 区间的起止点对应能量的拐点,即邻域内二阶差分运算为零的点。

2.3 高危动作分类

新生仔猪免疫力低,生长所需的环境温度接近母猪胸、腹部体温,母猪胸部作为发热源和奶源,吸引仔猪在其周边活动。母猪的突然坐下及趴卧,极易引起后驱或腹侧压仔猪:按照对小猪的伤害程度从小到大排列,分别为坐立→立卧(SI→LS)、站立→坐立(ST→SI)、站立→立卧(ST→LS)、站立→侧卧(ST→LL)和坐立→侧卧(SI→LL),其中与站立→侧卧(ST→LL)比较,从坐立→侧卧耗时更短,危险系数也更高。高危动作类型依据动作发生前后身体姿态来判定^[19],动作分类的具体步骤如图1所示。

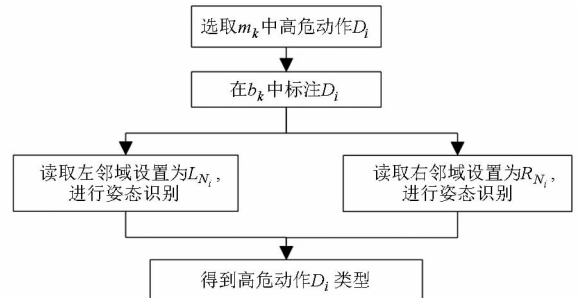


图1 高危动作分类算法

Fig. 1 Classification algorithm of dangerous body movement

3 实验与结果分析

3.1 行为数据采集

本实验在江苏省句容市江苏农林职业技术学院

小梅山原种猪场开展。选择 5 头产仔日期相近、身体状况良好的哺乳期母猪为研究对象,饲养在离地 30 cm 的 2.1 m × 1.8 m (长 × 宽) 高床限位栏中,底部配以塑料漏缝地板。行为数据采集节点由 MPU6050 型传感器、HM-10 型蓝牙发送模块、2 节 4 800 mA·h 的锂电池和防水盒构成,通过皮带固定在母猪颈部正下方位置^[18],如图 2 所示。其松紧度应确保节点仅绕母猪颈部偏转,利用基于姿态角偏转校正法^[11]进行数据校正,解决因偏转引起的误差;数据接收节点通过蓝牙接收模块的 USB 端口连接到计算机,实现猪舍环境下 42 m 内无线数据通信。母猪视频监控设备选用海康威视 DS-2CE5582P 型摄像头采集 30 万像素图像,支持日夜转换和红外灯照射,有效视距为 10 ~ 30 m;配以海康威视 DS-7924H-SH 型 24 路硬盘录像机及 2TB 硬盘记录 2015 年 1 月 18 日—2 月 27 日每天 24 h 的行为视频,如图 3 所示。



图 2 行为数据采集节点

Fig. 2 Node of behavior data acquisition



图 3 母猪行为视频监控

Fig. 3 Video monitoring system of sow's behavior

3.2 实验结果分析

3.2.1 阈值选取

参照图像分割算法中前、背景色直方图统计法,

提出基于运动能量直方图的阈值选取方法:图 4 中,直方图呈现出多峰值形状,其中峰值是邻域内高频能量点,对应着一个分类的聚类中心;谷值则对应低频能量点,是相邻 2 个类别间的分界。选择第 1/2 类间波谷中心点设为阈值 σ ,同时选择最后 2 个显著峰值(频率大于等于 5 Hz)之间的谷值中心作为高能阈值 θ 。

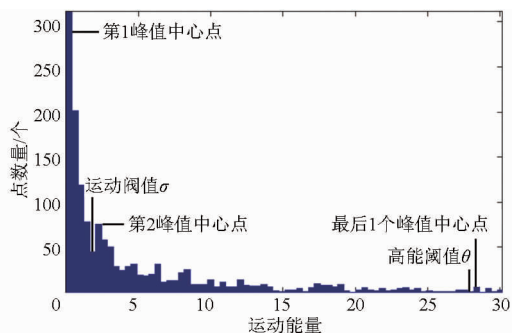


图 4 1 号母猪运动能量的直方图统计

Fig. 4 Energy histogram of No. 1 sow

表 2 利用 K-means 聚类法和直方图统计法分别计算了 5 头哺乳母猪的静止/运动阈值 σ 和高能阈值 θ ,其中 K-means 聚类结果依赖于数据分布和初始聚类中心的选择,将行为点分为静止、轻幅运动和大幅运动 3 种类型,静止/轻幅运动的分界点记为静止/运动阈值 σ ,轻幅/大幅运动的界限记为高能阈值 θ 。然而,限位栏空间狭小限制了哺乳母猪正常行为的表达,母猪绝大部分时间处于休息和哺乳的静止状态,采用聚类法极易陷入局部最优解,与直方图统计结果比较,阈值 σ 偏大,缩小了运动区域的有效范围。其次,母猪俯身时,在重力作用下,身体失重产生一个垂直方向的瞬时加速度 a_{\perp} ,即动作幅度 $|a_{\perp}| \geq 0.8g$,其中垂直方向的能量权重 $w_{\perp} = w_x$,若其它方向上的加速度变化忽略不计,则 $\theta = a_{\perp}^2 w_{\perp} \approx (0.8)^2 \times 40 = 28$,与直方图统计法中除 4 号母猪外的运算结果基本一致,可作为高能动作阈值设置的参考依据。4 号母猪是一头体质量 165 kg、10 胎次的经产母猪,与其它母猪相比,坐立时间较长,而躺卧哺乳的总时长略短一些,因此阈值 σ 高于其它母猪;同时,笨重的体型也影响了母猪总运动量,导致高能阈值 θ 略低于其它母猪。

3.2.2 静止/运动区域划分

根据阈值 σ ,对照运动能量曲线中邻窗内数值大于 σ 的运动点构成三轴加速度曲线的运动区域 M,其它为静止区域 S。图 5 是 1 号母猪 2015 年 1 月 19 日 11:00—16:00 的静止/运动区域的划分结果,设置 $\sigma = 1.84$ 在运动能量曲线中用红色水平虚线标注,黑色竖直虚线是静止与运动区域的分界线,用蓝绿色竖直虚线标识出能量大于 σ 的孤立

表2 不同方法的阈值结果比较

Tab.2 Comparison of thresholds in different methods

序号	K-means 聚类法					直方图统计法				
	静止聚 类中心	轻幅聚 类中心	大幅聚 类中心	静止/运动 阈值 σ	高能阈值 θ	第1 峰值	第2 峰值	最后1个 显著峰值	静止/运动 阈值 σ	高能阈值 θ
1	0.71	17.30	96.97	8.99	55.75	0.20	2.25	28.40	1.84	28.00
2	0.31	9.72	32.80	5.01	21.28	0.21	1.51	29.09	1.23	28.27
3	1.12	14.66	59.91	7.81	36.38	0.23	2.32	30.65	1.87	29.09
4	0.21	8.11	26.32	4.16	17.11	0.20	2.72	25.14	2.08	24.18
5	0.45	11.84	28.63	6.14	20.20	0.21	1.46	31.8	1.04	30.97

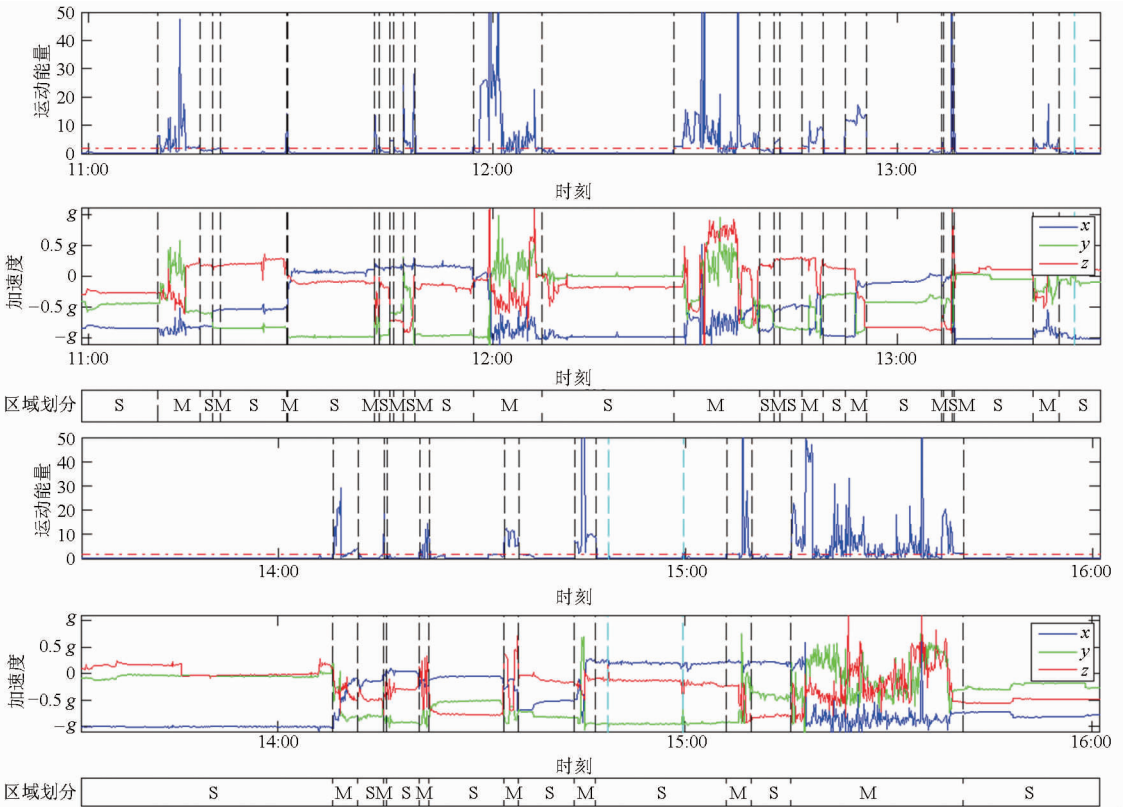


图5 静止/运动区域划分

Fig.5 Division of static/motion region

点,孤立点主要由仔猪触碰节点或节点受外力作用突然偏转引起的。

3.2.3 高危动作标注及识别结果

根据直方图统计法计算高能阈值 θ , 结合 2.2 节中描述高危动作识别方法, 确定高危动作区间及左右邻域的姿态, 通过观察录像统计对高危动

作的识别效果进行验证, 结果如图 6 所示, 其中黑色竖直虚线标注出高危动作区间, 邻域边界用蓝绿色竖直虚线标注。

对 1 号母猪哺乳期连续 10 d 的行为监测中, 母猪实际发生高危动作为 327 次, 利用本文方法标识出高危动作发生 343 次, 其中正确标注的 298 次, 漏

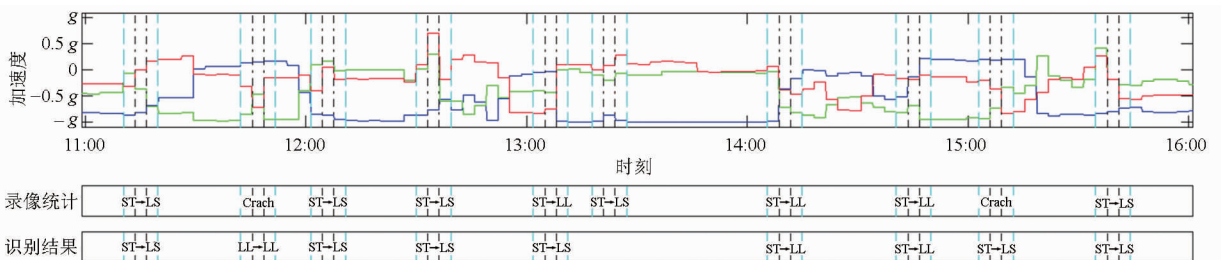


图6 高危动作类型识别

Fig.6 Recognition of dangerous body movement

检 29 次系阈值 θ 偏高导致,仔猪在母猪躯体上取暖时触碰到节点又造成了 45 次误检,准确率为 77.4%;部分误检通过动作类型判别进行修正,若左、右邻域的姿态都为卧姿,则将该动作类型记为碰撞(Crash);其次,对高危动作类型正确识别 267 次,准确率达到了 81.7%,产生误差的原因是母猪躺卧方向与节点佩戴方向一致时,节点摩擦地面产生的偏移造成侧卧姿(LL)识别为立卧姿(LS)。

3.3 母猪俯卧指数的计算

依据母猪俯卧动作的小心程度^[22]评价母猪的俯卧指数,包括趴下前嗅闻仔猪、拱地、趴卧地点是否有仔猪及趴卧的姿态等重要指标,其中俯卧时垂直趴下或是重重地侧卧是衡量俯卧指数的重要标准之一,自定义各俯卧动作的危险分值:从坐立→立卧得 1 分,从站立→坐立、立卧各得 2 分,从站立→侧卧得 4 分,坐立→侧卧得 5 分,结合趴卧动作发生频率计算其危险得分为

$$S_{\text{danger}} = \sum_{i=1}^k s_i p_i \quad (5)$$

式中 k ——高危动作类型数

s_i ——对应各动作分值

p_i ——各动作出现的概率

将危险得分转换为俯卧指数 B_{bend} ,得

$$B_{\text{bend}} = 10(1 - N(S_{\text{danger}})) \quad (6)$$

其中, N 为归一化函数,归一化结果得到 $[0, 1]$ 的指数结果,设置总分数为 10 分,则母性行为中俯卧指数的分数越高,说明母猪俯卧时越小心,断奶前仔猪的压死死亡率越低。

表 3 分别列出 5 头母猪的俯卧指数,其中 4 号母猪的得分最低,对其行为分类统计结果表明,该头母猪坐立的时间最长,姿态的变换频率高,哺乳时间相对短,多次出现从坐立→侧卧,这种动作的危险得分最高,且几乎没有出现在其他哺乳母猪的行为中,

这与 4 号母猪的硕大体型(体质量 165 kg)有直接关系,坐立可缓解身体对后腿的压力。但 5 号母猪的胎次同样超过 10,其俯卧指数得分较高,说明 5 号母猪的母性行为等级较高,今后可进一步验证基因测序与得分结果的关系,同时考虑对后备母猪、妊娠母猪采取限饲喂养也是提高生产性能的关键技术之一。

表 3 俯卧指数得分

Tab.3 Score of bend index

序号	得分	备注
1	3.3	1 胎,产仔 8 只
2	3.5	1 胎,产仔 6 只
3	3.9	3 胎,产仔 14 只
4	2.3	10 胎,产仔 6 只
5	3.8	12 胎,产仔 18 只

4 结论

(1) 利用小波变换将加速度函数划分为姿态函数和动态幅度函数,计算动态幅度函数各点的运动能量;与 K-means 聚类法的结果比较,采用直方图统计法设置运动阈值和高能阈值,能够更准确地划分静止和运动区域,及标注高危动作区间,对动作类型的判断依据动作发生前后的姿态来确定。

(2) 对母猪连续 10 d 的高危动作识别结果对照录像观察,其中准确标注出动作区间 298 次,漏检 29 次,错检 45 次,准确率为 77.4%,其中动作类型识别正确 267 次,准确率为 81.7%,误差产生的原因包括阈值 θ 偏高及节点偏移导致的姿态识别误差。

(3) 利用俯卧姿态计算俯卧指数,相同或相近胎次的不同母猪俯卧指数差异明显,因此将俯卧指数作为衡量母猪母性行为的参考标准之一,今后可通过其他母性评价指标及 PRLR 基因的 SNP 位点进一步完善和验证结果。

参 考 文 献

- Lay Jr D C. Management tips to reduce pre-weaning mortality[C]//Forty-sixth Annual North Carolina Pork Conference, 2002.
- Chidgey K L, Morel P C H, Stafford K J, et al. Sow and piglet productivity and sow reproductive performance in farrowing pens with temporary crating or farrowing crates on a commercial New Zealand pig farm[J]. *Livestock Science*, 2015, 173(3): 87-94.
- Mousten V A, Hales J, Lahrman H P, et al. Confinement of lactating sows in crates for 4 days after farrowing reduces piglet mortality[J]. *Animal*, 2013, 7(4): 648-654.
- Weary D M, Pajor E A, Fraser D, et al. Sow body movements that crush piglets: a comparison between two types of farrowing accommodation[J]. *Applied Animal Behaviour Science*, 1996, 49(2): 149-158.
- 顾招兵, 李明丽, 高娅俊, 等. 自由式分娩猪栏设计及应用效果[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(增刊 2): 40-44.
Gu Zhaobing, Li Mingli, Gao Yajun, et al. Design of freedom farrowing pen and application effects[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(Supp. 2): 40-44. (in Chinese)
- Marchant J N, Broom D M, Corning S. The influence of sow behaviour on piglet mortality due to crushing in an open farrowing system[J]. *Animal Science*, 2001, 72(1): 19-28.
- Pitts A D, Weary D M, Fraser D, et al. Alternative housing for sows and litters. Part 5. Individual differences in the maternal

- behaviour of sows[J]. *Applied Animal Behaviour Science*, 2002, 76(4): 291–306.
- 8 Maestripieri D. Maternal anxiety in rhesus macaques (*Macaca mulatta*): II. Emotional basis of individual differences in mothering style [J]. *Ethology*, 1993, 95(1): 32–42.
- 9 崔世泉. 猪的母性行为及其与催乳素受体基因关系的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2006.
Cui Shiquan. Studies on maternal behaviour of sows and its relationship with prolactin receptor gene [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- 10 闫丽, 沈明霞, 刘龙申, 等. 基于二次对数能量熵小波包的母猪哺乳声去噪方法研究[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(11): 365–371.
Yan Li, Shen Mingxia, Liu Longshen, et al. Denoising method of log energy entropy quadratic wavelet packet in sows' lactating vocalization [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(11): 365–371. (in Chinese)
- 11 闫丽, 沈明霞, 姚文, 等. 基于 MPU6050 传感器的哺乳期母猪姿态识别方法研究[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(5): 109–115.
Yan Li, Shen Mingxia, Yao Wen, et al. Recognition method of lactating sows' posture based on sensor MPU6050 [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(5): 109–115. (in Chinese)
- 12 Wu Jiahui, Pan Gang, Zhang Daqing, et al. Gesture recognition with a 3-D accelerometer [J]. *Ubiquitous Intelligence and Computing*, 2009, 5585(6): 25–38.
- 13 张恒智. 基于3轴加速度信息的信号分析与运动监测[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
Zhang Hengzhi. Signal analysis and daily activity monitoring based on 3D accelerometer [J]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011. (in Chinese)
- 14 Tuulari E. Methods and technologies for experimenting with ubiquitous computing [M]. VTT Publications 560, 2005.
- 15 Bouten C V C, Sauren A A H J, Verduin M, et al. Effects of placement and orientation of body-fixed accelerometers on the assessment of energy expenditure during walking [J]. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 1997, 35(1): 50–56.
- 16 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的设计[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)
- 17 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): 191–196.
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): 191–196. (in Chinese)
- 18 Cornou C, Lundbye-Christensen S. Classifying sows' activity types from acceleration patterns: an application of the multi-process Kalman filter [J]. *Applied Animal Behaviour Science*, 2008, 111(3): 262–273.
- 19 Cornou C, Lundbye-Christensen S, Kristensen A R. Modeling and monitoring sows' activity types in farrowing house using acceleration data [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2011, 76(2): 316–324.
- 20 许宏骏. 以个人数位助理(PDA)为基础之可穿戴式跌倒即时监测系统[D]. 台中: 逢甲大学, 2004.
- 21 Marchant J, Broom D. Factors affecting posture-changing in loose housed and confined gestating sows [J]. *Animal Science*, 1996, 63(3): 477–486.
- 22 Špinková M, Illmann G, de Jonge F, et al. Dimensions of maternal behaviour characteristics in domestic and wild × domestic crossbred sows [J]. *Applied Animal Behaviour Science*, 2000, 70(2): 99–114.