

团体标准

T/CAAMM 410—2026

奶牛跛行自动检测 机器视觉法

Automatic detection of lameness in dairy cows—Machine

vision method

(报批公示稿)

202X-XX-XX 发布

202X-XX-XX 实施

中国农业机械工业协会 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 跛行程度分级	2
5 跛行检测流程	3
6 跛行数据采集	3
7 奶牛身体关键点定位	5
8 跛行特征提取	6
9 跛行检测模型构建与验证	11

前 言

本文件按照 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》给出的规则起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的提出和发布单位不承担识别专利的责任。

本文件由中国农业机械工业协会提出。

本文件由中国农业机械工业协会归口。

本文件起草单位：河南科技大学、东北农业大学、山东农业大学、西北农林科技大学、宁夏金宇智慧科技有限公司。

本文件主要起草人：赵凯旋，张瑞红，王俊，沈维政，宋怀波、戴百生，田富洋、于镇伟、马军。

本文件为首次发布。

奶牛跛行自动检测 机器视觉法

1 范围

本文件描述了使用机器视觉方法进行奶牛跛行自动检测的术语和定义、跛行程度分级、跛行检测流程、跛行数据采集、奶牛身体关键点定位、跛行特征提取、跛行检测模型构建与验证等内容。

本文件适用于标准化养殖场成年奶牛进行跛行行为检测。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期的对应版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 16568 奶牛养殖场兽医卫生规范

GB/T 20014.8 良好农业规范 第8部分：奶牛控制点与符合性规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

奶牛跛行 cow lameness

由蹄部、关节或肌肉骨骼损伤或疾病等引起的，导致奶牛病肢或躯体运动能力下降、步态异常的现象。

3.2

支撑相 support phase

奶牛蹄部与地面有接触这一阶段的全过程。

3.2

摆动相 swing phase

奶牛蹄部与地面无接触、肢蹄向前移动这一时期。

3.3

运动周期 motion cycle

奶牛某只肢蹄开始离地到该肢蹄再次离地的全过程。

3.4

头部-四蹄联动特征 head-hoof linkage feature

后蹄落地瞬间奶牛头部的摆动幅度。

3.5

背部-四蹄联动特征 back-hoof linkage feature

后蹄落地瞬间的奶牛背弓曲率。

3.7

步长不一致性 asymmetry of stride length

奶牛前蹄步幅差的绝对值与后蹄步幅差的绝对值之中的最大值。

3.8

跟踪性能 tracking up

奶牛行走过程中后蹄蹄尖落地点与同侧前蹄蹄尖落地点之间的纵向距离（或时间间隔），取左右两侧计算所得的最大值作为量化指标。

3.9

着地速度 landing speed

奶牛从牛蹄准备落地到停止运动期间的平均速度。

4 跛行程度分级

奶牛跛行程度依据站立姿态、行走步态及背部姿态等特征进行综合评分，并划分为健康（1 分）、轻度（2 分）、中度（3 分）和重度（4 或 5 分）四个等级。各等级判定依据见表 1。

表 1 奶牛跛行人工评分准则

评分	跛行程度	姿态特征描述	图例	
			站立状态	行走状态
1	健康	站立和行走时背部均为平直状态，行走时步态正常。		
2	轻度	站立时背部平直，但行走时呈弓背，行走时步态正常。		
3	中度	站立和行走时均表现出弓背姿态，步态呈短步幅，一条或多条肢体步态异常。		

4	重 度	站立和行走时均表现出明显弓背,步态明显异常,一个或多个肢蹄着地比较犹豫。		
		背部高度拱起,不愿移动,几乎完全避免患肢负重,身体重量几乎全部转移至其它。		

奶牛跛行程度的人工评分应由不少于 3 名具有奶牛养殖、兽医或跛行评价相关经验的专业人员独立完成。评分人员应按照表 1 规定的评分准则,在互不干扰的情况下分别进行评分。评分完成后,应对评分结果进行一致性评价,一致性系数不低于 0.80。在满足评分一致性要求的基础上,按照多数原则确定奶牛最终跛行等级;当评分结果无法形成多数意见时,该次评分结果应判定为无效,不作为跛行自动检测模型训练和验证的参考值。

5 跛行检测流程

奶牛跛行自动检测流程包括视频采集、身体关键点定位、运动轨迹优化、跛行特征提取、跛行程度分类等环节,流程见图 1。

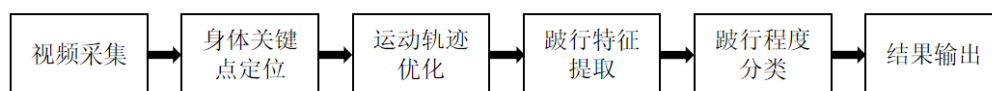


图 1 跛行自动检测流程图

6 跛行数据采集

本章规定了基于机器视觉的奶牛跛行自动检测的数据采集环境、设备、操作及质量校验。

6.1 行走通道要求

设置直线型专用采集通道,长度不应小于 5m,宽度宜为 1.5m~2m;两侧设置高度分别 0.5m 和 1m 的横向钢丝绳,能够限制奶牛行走在步道区域内;通道地面应平整防滑,无积水、粪便、杂物遮挡,蹄部接触区域无明显色差斑块,通道背景应简洁统一,无冗余干扰物体。

6.2 环境要求

在自然光环境下进行采集，应保证行走区域光照稳定均匀，光照强度不低于 10000 Lux，顺光或侧光拍摄，不应逆光拍摄；可加装偏振镜、遮光罩抑制镜面反光；采集环境温度宜为 20℃~30℃，区域内应保持安静，无强噪音、强气流刺激，避免无关人员、动物进入拍摄视场。

6.3 采集设备及布置

采集相机分辨率不应低于 1920×1080，采集帧率不应低于 25fps，像素深度不低于 8bit，视场角在 55°~75°之间；接口宜采用 USB3.0 等高速稳定类型，运行稳定无丢帧。采用高度可调的工业三脚架或固定支架，高度调节精度不低于 1cm，采集过程无晃动位移；相机镜头光学中心距地高度 0.9m~1.1m 之间，相机与过道的距离在 3m~4m 之间，移动相机与过道的距离，保证相机视野覆盖整个行走区域，相机光轴与行走方向垂直，角度偏差不超过±5°；控制相机的俯仰和倾斜角，使其处于水平状态。每批次采集前应使用标定板对相机内参标定，并进行畸变校正；选取 1 头~2 头健康牛只预采集，验证视场、清晰度、步态周期与光照效果，不合格则重新调试。

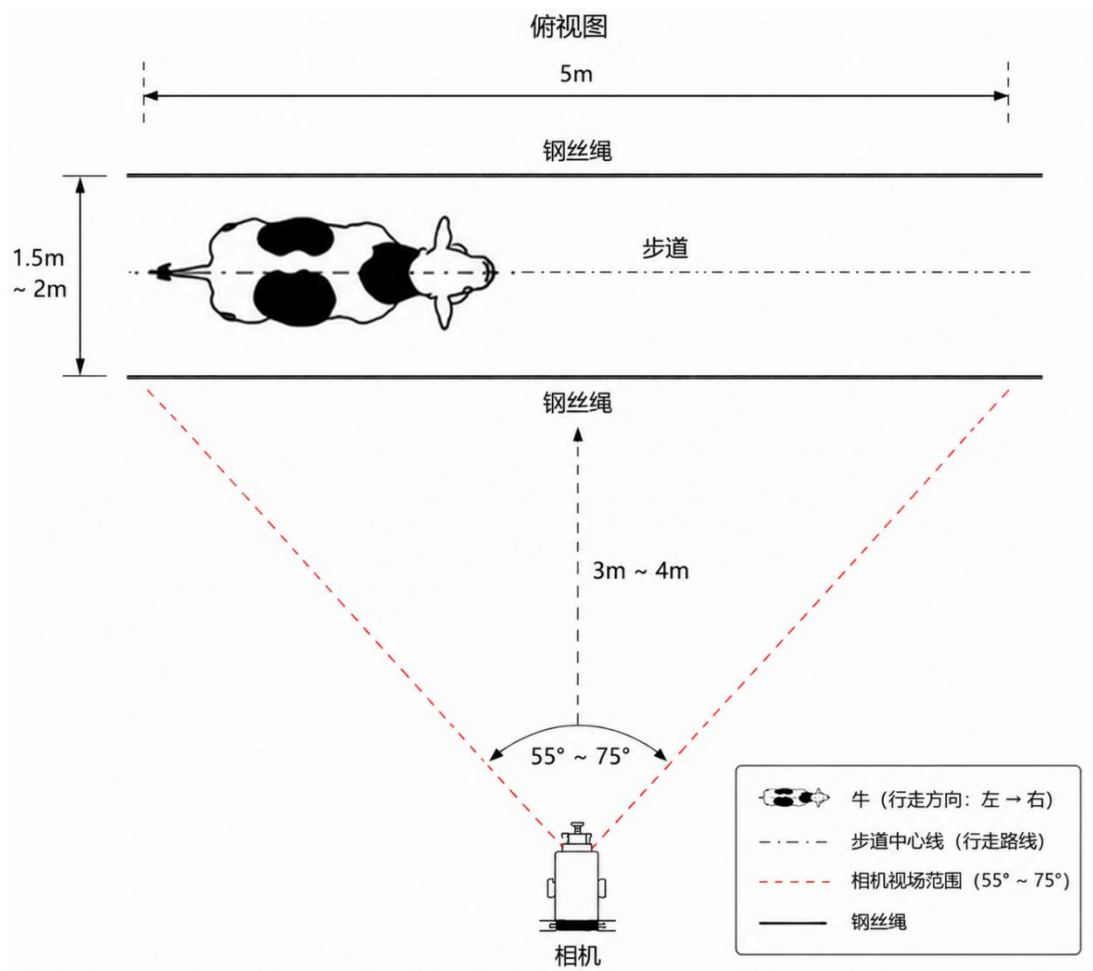


图 2 采集系统布局俯视图

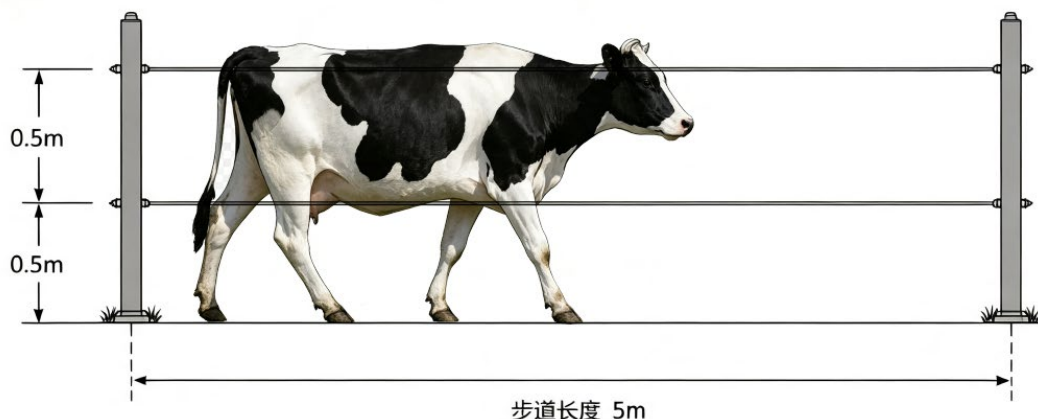


图3 采集系统布局侧视图

6.4 采集操作规范

应采用温和方式引导牛只直线匀速行走，不应暴力驱赶，采集过程应满足 GB/T 16568 中对卫生管理和生物安全的要求，并满足 GB/T 20014.8 中对动物福利的要求。相邻牛只入通道间隔不小于 3m，保证单段视频仅含 1 头牛只。采集过程中相机保持静止，不得移动、变焦或调整参数，光照明显变化时应暂停采集并重新调试；牛只停留转身、身体过度倾斜、画面遮挡失焦、行走距离不足等情况判定为无效，应重新采集。

7 奶牛身体关键点定位

应检测以下 5 个关键点在图像中的坐标位置。鼻尖（Nose）：头部最前端，以鼻镜上缘中点为准；左前蹄尖（FL）、右前蹄尖（FR）：前肢蹄尖与地面的接触点；左后蹄尖（HL）、右后蹄尖（HR）：后肢蹄尖与地面的接触点。

应采用基于深度学习的姿态估计网络对视频帧图像进行关键点检测。检测模型应在奶牛侧视数据集上经过训练和验证，关键点正确估计比例以小数或百分数表示，数值越大表示关键点正确检测的可靠性越强。关键点正确估计比例（PCK）应 ≥ 0.85 。计算公式：

$$PCK_{\sigma}^p = \frac{1}{M} \sum_{f=1}^M \delta(\|x_p^f - y_p^f\|_2 < \sigma) \quad (1)$$

式中：

PCK_{σ}^p ——判定阈值为 σ 时，第 p 类关键点的正确估计比例；

p ——关键点类别（头部、右后蹄、右前蹄、左后蹄、左前蹄）；

M ——测试集的总帧数；

x_p^f ——第 f 帧中第 p 类关键点的预测坐标向量；

y_p^f ——第 f 帧中第 p 类关键点的真值坐标向量；

$\|\cdot\|$ ——二维欧氏距离运算；

σ ——距离判定阈值，单位为像素（pixel），本标准取值为 25；

$\delta(\cdot)$ ——指示函数，括号内条件成立时取值为 1，不成立时取值为 0。

检测结果如图 4 所示。图 4 中关键点的颜色标识仅为示例，实际应用中可采用其他配色方案。根据检测得到的关键点坐标，应生成如图 5 所示的牛蹄在 X 轴方向的运动轨迹曲线，作为步态周期划分和特征提取的依据。

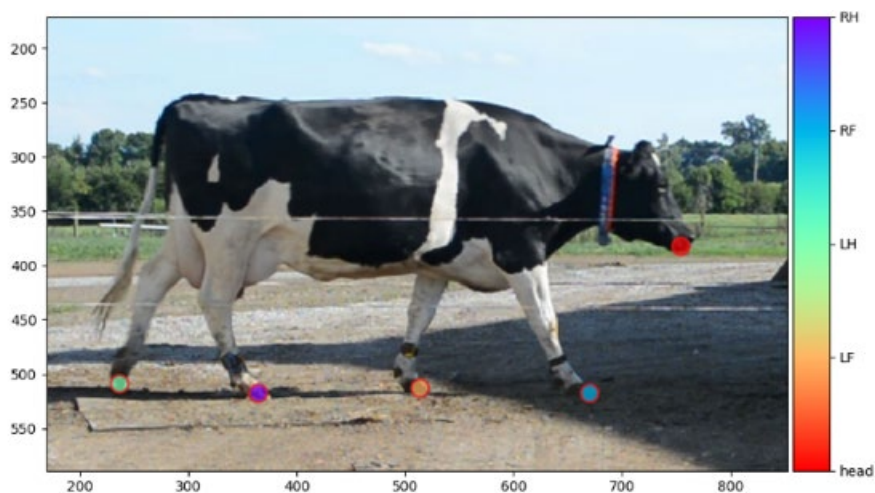


图4 奶牛身体关键点定位

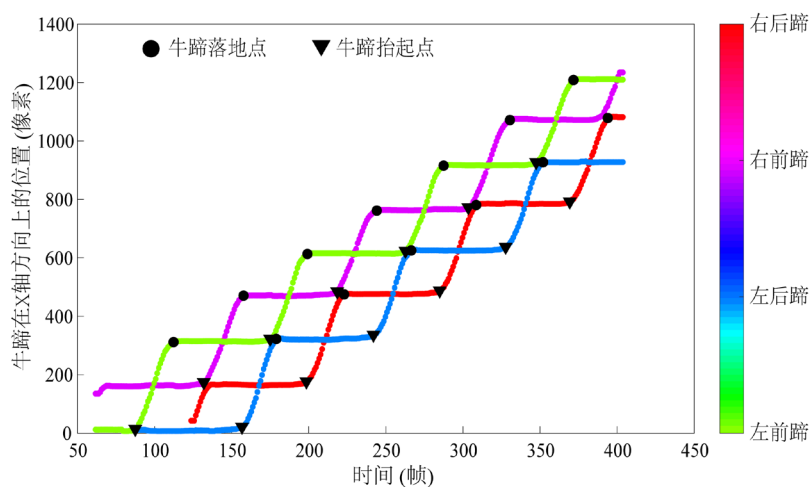


图5 X轴方向上的牛蹄运动曲线

8 跛行特征提取

8.1 头部-四蹄联动特征提取

头部-四蹄联动特征用于描述奶牛运动时的头部摆动幅度。当奶牛行走视频中同时满足条件a)和b)，且满足c)或d)时，判定为具有头部-四蹄联动特征：

- a) 每次蹄部触地均伴随有牛头下垂动作；
- b) 蹄部着地略早于牛头下垂摆动；
- c) 任意连续的两个牛头下垂区间内，左右两后蹄对应的头部摆动幅度差异较大（>1像素值）；
- d) 任意连续的两个牛头下垂区间内，左右两后蹄对应的头部摆动幅度均较大（>10像素值）。

根据牛头位置绘制奶牛头部摆动曲线，如图6所示。在奶牛头部摆动曲线中找到曲线中的局部极大点 $Q_{ih}(Q_{iht}, Q_{ihy})$ 和后续最近的极小点 $Q_{il}(Q_{ilt}, Q_{ily})$ 。当满足公式(2)时，判定找到与四蹄联动的牛头下垂区间 $[Q_{iht}, Q_{ilt}]$ ：

$$(C_i > Q_{ih}t - Tt) \cap (C_i < Q_{il}t) \quad (2)$$

式中：

Q_{iht} ——头部摆动曲线中第*i*个极大点出现的时刻；

Q_{it} ——头部摆动曲线中第*i*个极小点出现的时刻；

C_t ——牛蹄着地时刻；

T_t ——牛蹄触地提前时间推荐初始值为5帧（ T_t 的推荐值基于前期实验统计得出，实际应用时应根据视频帧率校准）。

对连续的4个下垂区间进行分析，若均满足公式(3)或公式(4)，则判定该奶牛具备头部-四蹄联动特征， F_1 为1，否则 F_1 为0。

$$w_i = Q_{ih}y - Q_{il}y$$

$$(w_1 - w_2) \times (w_3 - w_4) > 0 \wedge |w_1 - w_2| > dt \wedge |w_3 - w_4| > dt \quad (3)$$

$$\min(w_1, w_2, w_3, w_4) > wt \quad (4)$$

式中：

w_i ——第*i*个头部下垂区间的头部摆动幅度，单位为像素；

$Q_{ih}y$ ——头部摆动曲线中第*i*个极大点对应的*y*值；

$Q_{il}y$ ——头部摆动曲线中第*i*个极小点对应的*y*值；

Dt ——差值阈值(阈值建议初始值为1个像素值)；

Wt ——头部摆动幅度阈值(阈值建议初始值10个像素值)。

阈值 T_t 、 dt 、 wt 是示例值，实际应用中可根据视频分辨率、奶牛体型及相机距离进行校准。

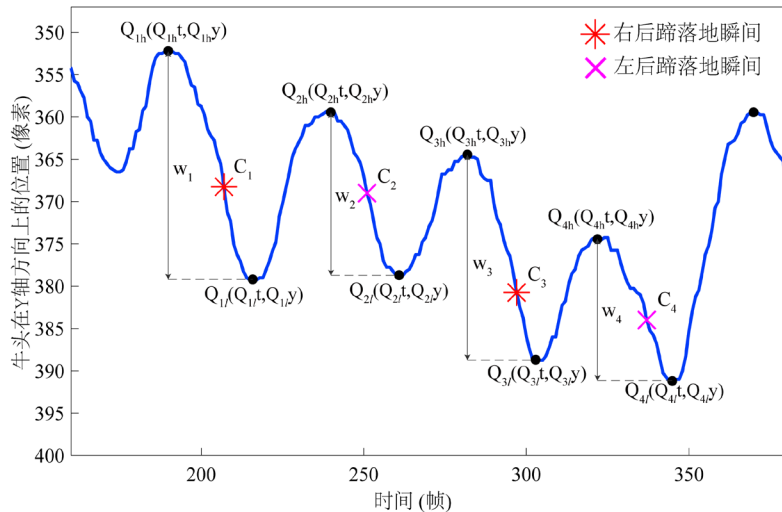


图6 头部摆动曲线

8.2 背部-四蹄联动特征提取

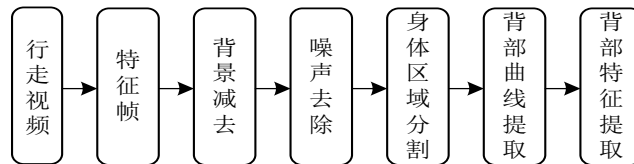


图7 背部-四蹄联动特征提取步骤图

图7所示为背部-四蹄联动特征提取步骤。根据图7所示的步骤获取包含奶牛形状的二值图像，在获取的二值图像中，奶牛目标区域的像素值为1，显示为白色，背景区域的像素值均为0，显示为黑色。接着，定位整个牛体(不包含腿部)，构造奶牛身体的外接矩形，并提取背部-四蹄联动特征。背部-四蹄联动特征用于量化奶牛行走过程中背部的弯曲程度。该值越大，表明奶牛弓背现象越严重，是跛行评估的核心指标之一。图

8为提取奶牛背部-四蹄联动特征的参数实例。计算从奶牛尾巴到颈部之间背部曲线上最高像素点与背部曲线上所有像素点之间的平均距离作为背部-四蹄联动特征 F_2 (像素)用于跛行评估。

$$F_2 = \frac{\sum_{l1}^{l2} h(x)}{l2-l1} = \frac{\sum_{l1}^{l2} (B(x)-A_y)}{l2-l1} \quad (5)$$

式中：

$h(x)$ ——背部曲线上最高像素点所在行数与背部曲线上第 x 列像素点所在行数之间的差值；

$B(x)$ ——背部曲线上第 x 列像素点对应的行数；

A_y ——背部曲线上最高像素点对应的行数；

$l1$ ——尾巴所在的列数；

$l2$ ——颈部所在的列数。

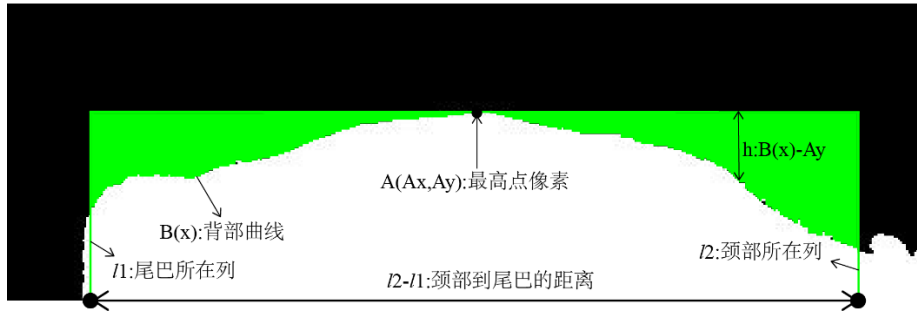


图8 奶牛背部-四蹄联动特征的提取方法

8.3 步长不一致性与跟踪性能

图 9 为奶牛一个运动周期内四只牛蹄的运动曲线，将奶牛四蹄全部抬起并落地一次定义为一个运动周期，对每头奶牛的右后、右前、左后、左前四只牛蹄分别编号为 1、2、3、4。步幅 d_i (像素)定义为 i 号牛蹄相邻两个落地点之间的距离，计算公式为：

$$d_i = \begin{cases} E_i - B_i & i=1,4 \\ E'_i - B'_i & i=2,3 \end{cases} \quad (6)$$

式中：

B_i ——一个运动周期内 i 号牛蹄第一个抬起点位置；

E_i ——一个运动周期内 i 号牛蹄第一个落地点位置；

B'_i —— i 号牛蹄第二个抬起点位置；

E'_i —— i 号牛蹄第二个落地点位置。

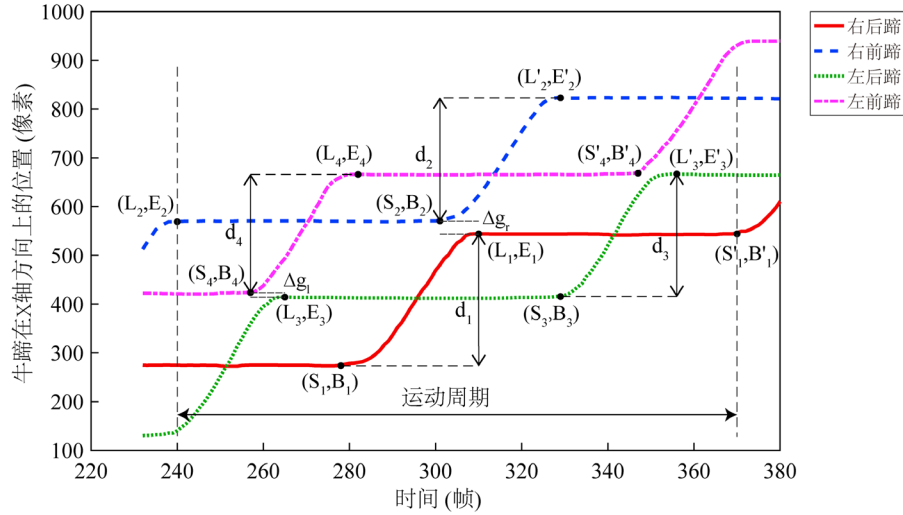


图9 奶牛一个运动周期内四只牛蹄的运动曲线

步长不一致性 F_3 (像素)定义为奶牛前蹄步幅差的绝对值与后蹄步幅差的绝对值之中的最大值。跟踪性能 F_4 (像素)定义为牛蹄左侧牛蹄落地点间隔与右侧牛蹄落地点间隔中的最大值,其中,牛蹄落地点间隔定义为一个运动周期内相邻前蹄落地点和后蹄落地点在 x 轴方向上相差的距离,图 10 为奶牛右侧牛蹄落地点间隔的示意图。 F_3 和 F_4 可以通过公式(7)和公式(8)计算:

$$F_3 = \max(|d_1 - d_3|, |d_2 - d_4|) \quad (7)$$

$$F_4 = \max(\Delta g_l, \Delta g_r) = \max(|B_4 - E_3|, |B_2 - E_1|) \quad (8)$$

式中:

Δg_l ——左侧牛蹄落地点间隔,单位为像素;

Δg_r ——右侧牛蹄落地点间隔,单位为像素。

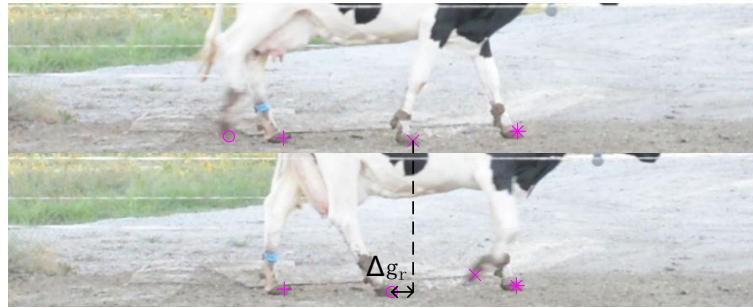


图10 右侧牛蹄落地点间隔示意图

8.4 着地速度

着地速度指奶牛单肢蹄在摆动相结束、蹄尖接触地面开始,至该肢蹄完全承重、运动停止期间的平均速度(运动停止时间通过图 9 曲线进行判定,即蹄部位置保持不变的开始时刻)。该指标用于量化奶牛落地时的避痛反应:速度越慢,表明奶牛落地谨慎,该肢蹄承重疼痛的可能性高。奶牛的牛蹄着地速度 F_5 (像素/帧)的计算公式为:

$$F_5 = \min(s_1, s_2, s_3, s_4) = \min\left(\frac{E_1 - E_{1-15}}{15}, \frac{E_2 - E_{2-15}}{15}, \frac{E_3 - E_{3-15}}{15}, \frac{E_4 - E_{4-15}}{15}\right) \quad (9)$$

式中:

s_i ——第 i 号牛蹄的着地速度;

E_{i-15} ——第 i 号牛蹄第一个落地点前 15 帧时牛蹄所在位置。

8.5 支撑相占比不一致性

图11为奶牛四蹄运动曲线中支撑相和摆动相的划分，支撑相与摆动相之和定义为每只牛蹄的步态周期。

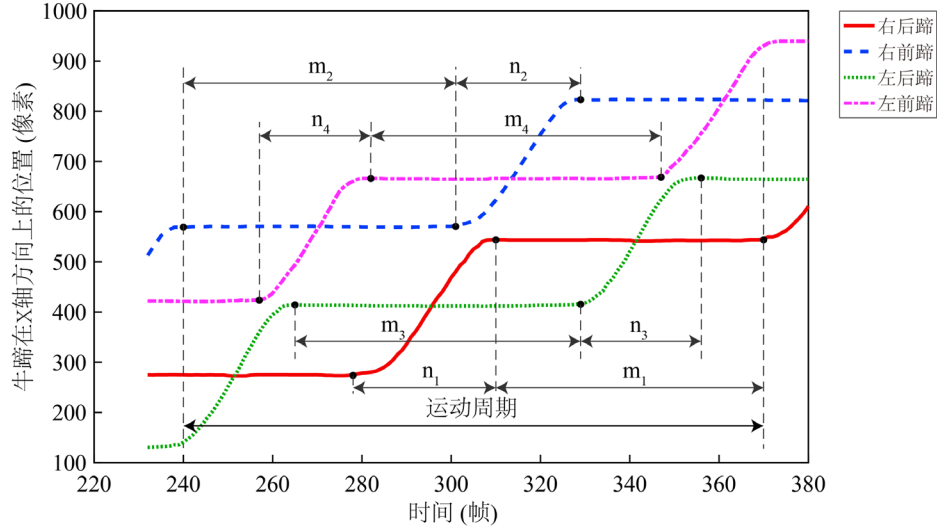


图 11 牛蹄支撑相和摆动相的划分

支撑相占比用于量化奶牛前后肢在承重时间上的对称性。该值越大，表明奶牛前躯或后躯的步态对称性越差。支撑相占比定义为牛蹄支撑相与步态周期的比值，跛行特征支撑相占比不一致性(F_6)定义为两个前蹄支撑相占比差的绝对值和两个后蹄支撑相占比差的绝对值之间的最大值，计算公式为：

$$m_i = \begin{cases} S'_i - L'_i & i=1,4 \\ S_i - L_i & i=2,3 \end{cases} \quad (10)$$

$$n_i = \begin{cases} L_i - S_i & i=1,4 \\ L'_i - S'_i & i=2,3 \end{cases} \quad (11)$$

$$T_i = m_i + n_i \quad i=1,2,3,4 \quad (12)$$

$$T'_i = \frac{m_i}{T_i} \quad i=1,2,3,4 \quad (13)$$

$$F_6 = \max(|T'_1 - T'_3|, |T'_2 - T'_4|) \quad (14)$$

式中：

S_i ——一个运动周期内*i*号牛蹄第一个抬起点的帧号；

L_i ——一个运动周期内*i*号牛蹄第一个落地点的帧号；

S'_i ——*i*号牛蹄第二个抬起点的帧号；

L'_i ——*i*号牛蹄第二个落地点的帧号；

m_i ——一个运动周期内*i*号牛蹄的支撑相；

n_i ——*i*号牛蹄的摆动相；

T_i ——*i*号牛蹄的步态周期；

T'_i ——*i*号牛蹄的支撑相占比。

8.6 运动速度

根据奶牛头部坐标绘制了一个运动周期内奶牛头部在 X 轴方向上的运动曲线（如图 12 所示）。运动速度用于量化奶牛行走时的整体运动能力。该值越低，表明奶牛因肢蹄疼痛而主动减缓行走速度的可能性越高，是描述跛行严重程度的全局性指标。奶牛的运动速度 F_7 (像素/帧)定义为一个运动周期内奶牛头部前进

的平均速度，计算公式为：

$$F_7 = \frac{u_E - u_B}{u_L - u_S} \quad (15)$$

式中：

u_B ——奶牛头部的起始位置；

u_E ——奶牛头部的终止位置；

u_S ——奶牛头部起始位置所对应的时间；

u_L ——奶牛头部终止位置所对应的时间。

在实际系统中进行像素尺度标定，将像素距离转换为实际距离。

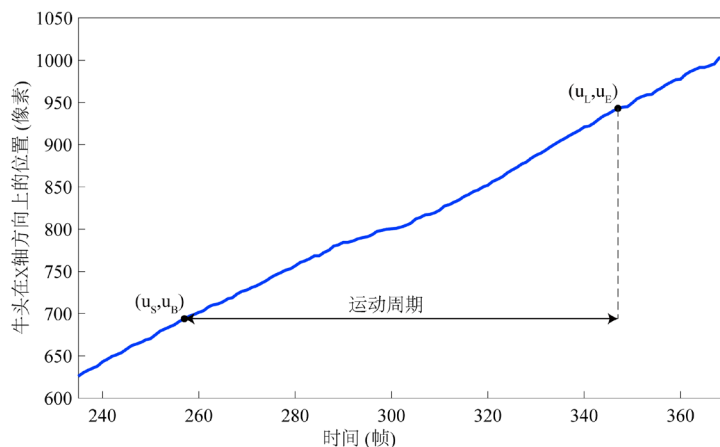


图 12 一个运动周期内奶牛头部在 X 轴方向上的运动曲线

表 2 跛行联动特征的定义及公式

跛行特征	定义	公式
头部-四蹄联动特征(F_1)	后蹄落地瞬间奶牛头部的摆动幅度是否正常	$(w_1 - w_2) \times (w_3 - w_4) > 0 \wedge w_1 - w_2 > dt \wedge w_3 - w_4 > dt$ 或 $\min(w_1, w_2, w_3, w_4) > wt$
背部-四蹄联动特征(F_2)	后蹄落地瞬间的奶牛背弓曲率	$\frac{\sum_{l=1}^2 h(x)}{l2 - l1}$

表 3 跛行运动特征的定义及公式

跛行特征	定义	公式
步长不一致性(F_3)	前、后蹄步幅差的绝对值之间的最大值	$\max(d_1 - d_3 , d_2 - d_4)$
跟踪性能(F_4)	左、右侧牛蹄落地点间隔之间的最大值	$\max(\Delta g_l, \Delta g_r)$
着地速度(F_5)	四蹄中着地速度的最小值	$\min(s_1, s_2, s_3, s_4)$
支撑相占比不一致性(F_6)	前后蹄支撑相占比差的绝对值间的最大值	$\max(T_1^i - T_3^i , T_2^i - T_4^i)$
运动速度(F_7)	奶牛头部前进的平均速度	$(u_E - u_B) / (u_L - u_S)$

9 跛行检测模型构建与验证

按照第4章提出的奶牛跛行分级标准，从规模化牧场中随机筛选健康、轻度跛行、中度跛行和重度跛行奶牛各50头，共200头奶牛，用于跛行检测模型的构建与验证。按照第6章所规定的视频采集要求，采集每头奶牛的行走视频，并依次采用第7章和第8章所述方法计算跛行特征参数，包括头部-四蹄联动特征（F1）、背部-四蹄联动特征（F2）、步长不一致性（F3）、跟踪性能（F4）、着地速度（F5）、支撑相占比不一致性（F6）以及运动速度（F7）等。

9.1 检测模型构建

从200头奶牛中，随机选取150头奶牛的数据构成训练集。将训练集每个样本的7个跛行特征参数作为模型输入，以奶牛跛行等级作为输出标签，采用决策树算法构建奶牛跛行自动检测模型，并采用10折交叉验证方法对模型进行训练，当模型分类准确率达到85%以上时，认为所构建模型满足奶牛跛行自动检测需求。

9.2 检测模型验证

将未参与模型训练的50头奶牛作为验证样本，利用所构建的跛行检测模型对验证样本进行自动检测，获得模型输出结果，并与人工跛行分级的结果进行对照验证，计算模型检测结果的准确率（Accuracy）和召回率（Recall），准确率和召回率均大于85%，即视为符合本文件要求。

准确率计算公式为：

$$\text{Accuracy} = \frac{N_c}{N} \times 100\% \quad (17)$$

式中：

N_c ——自动检测结果与人工分级结果一致的样本数量；

N ——参与评价的样本总数量。

召回率计算公式为：

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP+FN} \times 100\% \quad (18)$$

式中：

TP ——正确检测为对应跛行等级的样本数量；

FN ——实际属于对应跛行等级但模型未正确检测的样本数量。

附表 1 奶牛跛行自动检测结果评价记录表

序号	奶牛编号	人工分级结果	自动检测结果	是否一致
1				
2				
3				
.....				