


基于改进 FlowNet 2.0 光流算法的奶牛反刍行为分析方法

姬江涛¹ 刘启航^{1,2} 高荣华^{2,3} 李奇峰^{2,3} 赵凯旋¹ 白 强^{2,3}

(1. 河南科技大学农业装备工程学院, 洛阳 471003;
2. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097;
3. 北京市农林科学院信息技术研究中心, 北京 100097)

摘要: 反刍行为与奶牛生产、繁殖性能及疾病等因素密切相关, 针对非接触式奶牛反刍行为分析受牛只自身运动或背景干扰等不足, 提出改进 FlowNet 2.0 光流算法, 首先计算垂直光流分量替代光流速度构建光流图, 消除水平运动对光流分析干扰; 其次设置光流阈值避免垂直光流中头部运动光流干扰; 同步计算反刍区域面积阈值提取区域内光流数据, 避免目标对象头部运动对反刍光流的影响; 最后滤波拟合计算反刍曲线, 确定曲线周期, 增大波峰波谷差值, 提升奶牛反刍咀嚼频次计数的准确性。以不同场景下 20 头奶牛的 30 段反刍行为视频为数据集, 验证本文方法的有效性、鲁棒性与准确性, 试验结果表明, 改进 FlowNet 2.0 光流算法计算奶牛反刍咀嚼频次准确率为 99.39%, 相较于 FlowNet 2.0 光流算法准确率提升 5.75 个百分点。

关键词: 奶牛; FlowNet 2.0; 光流; 反刍行为; 咀嚼频次

中图分类号: TP391.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)01-0235-08 OSID: 

Ruminant Behavior Analysis Method of Dairy Cows with Improved FlowNet 2.0 Optical Flow Algorithm

Ji Jiangtao¹ LIU Qihang^{1,2} GAO Ronghua^{2,3} LI Qifeng^{2,3} ZHAO Kaixuan¹ BAI Qiang^{2,3}

(1. College of Agricultural Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China
2. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China
3. Research Center of Information Technology, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

Abstract: Ruminant behavior is closely related to dairy cow production, reproductive performance, disease and other factors. To overcome the shortage of non-contact dairy cow ruminant behavior analysis caused by cow movement or background interference, the FlowNet 2.0 optical flow algorithm was improved. Firstly, the vertical optical flow component was calculated instead of the optical flow velocity to construct an optical flow diagram to eliminate horizontal movement interference on optical flow analysis. Secondly, the optical flow threshold was set to avoid the interference of head movement flow in vertical optical flow. The area threshold of the ruminant area was calculated and the optical flow data was extracted in the region to avoid the influence of head movement flow of the target object. Finally, filter fitting was used to calculate the rumination curve, determine curve period, increase the difference between peak and valley, and improve the accuracy of counting of rumination frequency in dairy cows. The validity, robustness and accuracy of this method were validated by using 20 dairy cows and 30 ruminant videos in different scenarios. The results showed that the accuracy of improved FlowNet 2.0 optical flow algorithm was 99.39% and 5.75 percentage points higher than that of FlowNet 2.0 optical flow algorithm.

Key words: dairy cow; FlowNet 2.0; optical flow; rumination behavior; rumination frequency

收稿日期: 2022-07-27 修回日期: 2022-10-20
基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFE0125400)、国家自然科学基金项目(32002227)和北京市农林科学院科技创新能力建设专项(KJ CX20220404)
作者简介: 姬江涛(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农业装备和农业信息化技术研究,E-mail: jj0907@163.com
通信作者: 高荣华(1977—),女,副研究员,博士,主要从事深度学习在农业中的应用研究,E-mail: gaorh@nrcita.org.cn

0 引言

奶牛进食后一段时间,将未能消化的食物从食道返回口腔,重新咀嚼后吞咽的行为称为反刍行为^[1-3]。反刍行为与奶牛生产、繁殖性能及疾病等因素密切相关^[4-8]。STONE 等^[9]、KAUFMAN 等^[10]和 ANTANAITIS 等^[11]试验验证奶牛反刍时间与产奶量呈正相关性^[12]。ALMEIDA 等^[13]研究表明,奶牛患蹄病时其反刍时长明显下降。因此,监测奶牛个体反刍行为能够及时掌握其健康状况,便于早期发现患病牛只^[14],避免病情加重影响正常产奶和繁殖^[15-18],提高奶牛养殖水平。

反刍行为表现出来的视觉特征是逆呕-咀嚼-吞咽,一次行为发生的时间约为 70 s,每次反刍行为中咀嚼时间为 50 ~ 60 s,因此咀嚼次数是反刍行为最直观体现,且咀嚼次数减少意味着反刍行为异常。传统依靠人工监测并判断反刍行为异常的工作方式,效率较低、准确率难以保证。随着养殖规模扩大及现代化、精准化畜牧业发展,智能监测设备不断涌现^[19-21],使得反刍行为监测智能化成为可能。现有智能化反刍行为监测大多通过穿戴式设备,监测奶牛咀嚼加速度、声音规律等,该技术监测精度高、实时性强,但穿戴式监测设备安装成本高、易造成奶牛应激反应^[22]。随着视觉技术在养殖中应用逐渐增多,基于视频分析的奶牛反刍监测方法降低了接触式设备监测奶牛反刍行为的成本,避免了设备对奶牛造成的应激反应,是未来奶牛反刍行为监测发展的重要趋势。ANDRIAMASINORO 等^[23]结合惯性测量单元(Inertia measuring unit, IMU)识别奶牛反刍行为,准确率为 95.0%。CHEN 等^[24]采用 Mean-Shift 算法精确跟踪奶牛下颌运动,从视频中提取出牛嘴运动的质心轨迹曲线,实现奶牛反刍行为监测,准确率为 92.03%。REITER 等^[25]采用 Smartbow 算法创建了 Smartwell 视频分析系统监测奶牛每小时反刍时间,误差为 35.3 s。毛燕茹等^[26]通过 Kalman 滤波和 Hungarian 算法对同一奶牛上下颚区域关联匹配获取嘴部咀嚼曲线,实现多目标奶牛嘴部跟踪和反刍行为监测,咀嚼次数平均正确率为 96.93%。

基于视频分析的反刍行为监测方法,具有较强的光照敏感性,不适宜图像明暗程度差异较大的养殖环

境。而光流法不会受光照条件约束且能够保证较高检测率,被广泛应用到复杂养殖环境下动物行为分析。如宋怀波等^[27]利用 Lucas-Kanade 稀疏光流法分析视频序列帧中奶牛花斑边界平均光流变化规律,实现呼吸行为检测,帧处理耗时在 0.10 ~ 0.13 s 之间,检测平均准确率为 98.58%。李通^[28]提出了一种基于 Horn-Schunck 光流法的多目标奶牛嘴部区域自动检测方法,跟踪成功率达到 89.12%。段恩泽等^[29]基于优化 Mask RCNN 的实例分割网络和基于 LiteFlowNet 的光流计算网络,构建了一种死兔行为识别模型,识别准确率为 90%。其中 FlowNet 算法相较于传统光流算法光流计算速度更快,对视频帧间运动信息敏感,更加适合拥有丰富大小位移信息的反刍行为监测,而由于其高灵敏度运动感知能力,会不可避免受到反刍过程中奶牛头部小细节运动干扰。

本文改进 FlowNet 2.0 光流算法利用垂直光流分量替代光流速度计算光流图,消除水平运动对光流分析干扰;设置光流阈值避免垂直光流中头部运动光流干扰,在保持高灵敏度的同时减小其他运动影响。

1 数据集构建与研究方法

1.1 数据来源

2021 年 9 月—2022 年 3 月分别在北京市延庆大地群生奶牛养殖基地和北京市富农兴牧奶牛养殖中心采集奶牛反刍行为视频数据,使用高清网络摄像机,摄像机位于反刍奶牛头部侧边 45° ~ 90°,距离目标奶牛 0.5 ~ 1 m 位置,每段视频 1 ~ 2 min。

首先对反刍行为视频数据预处理,截取约 10 s 画质清晰视频段,每段 300 帧,筛选出 20 头奶牛共 30 段反刍行为视频为试验数据集。如图 1 所示,数据集为奶牛近距离侧面反刍行为,其中头部占据镜头主体区域,嘴巴进行大幅度的反刍咀嚼运动。反刍过程中,奶牛头部小幅度随机摆动与周围其他牛只运动干扰影响反刍光流特征提取。

1.2 理论方法

由于奶牛反刍行为位移较小,需要精度较高的全局光流分析算法才能捕获到反刍行为的规律特征。FlowNet 2.0 由大、小位移求解网络组成,能够捕获到小位移运动信息,因此本文以 FlowNet 2.0 为基础网络,网络结构如图 2 所示。



图 1 奶牛反刍运动视频示例

Fig. 1 Video example of cow rumination

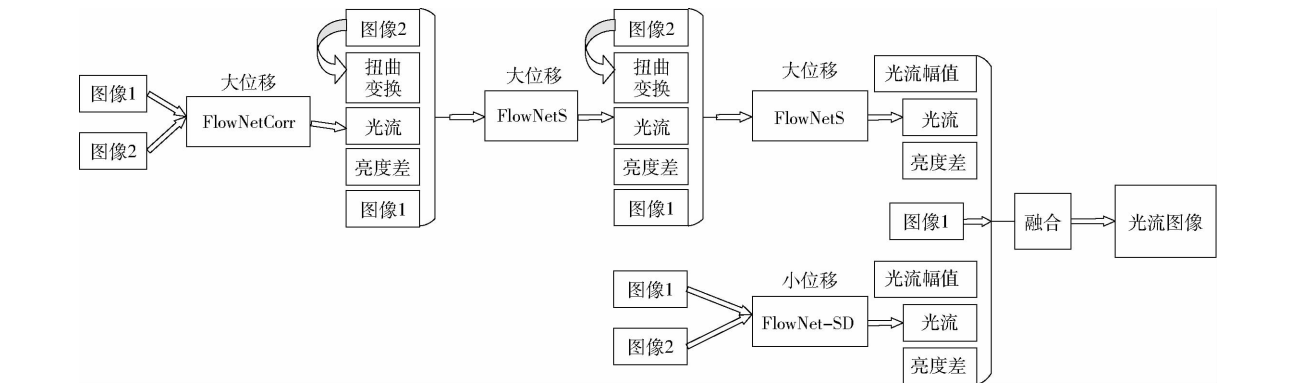


图 2 FlowNet 2.0 网络结构图

Fig. 2 FlowNet 2.0 network structure

图 2 中,FlowNetCorr、FlowNetS、FlowNetS 3 个网络串联组成大位移求解网络,FlowNet - SD 网络专注小位移求解。其中 FlowNetS 网络是只包含卷积层的连接输入两帧图像的通道;FlowNetCorr 中采用关联层促进网络匹配过程。设相邻两帧图像的多通道特征图分别为 f_1, f_2 , 其宽、高、通道数分别为 w, h, c 。关联层用来比较每个 f_1 和 f_2 中的图像块。定义 f_1 以位置 x_1 为中心的图像块和 f_2 以 x_2 为中心的图像块之间的关联性为

$$C(x_1, x_2) = \sum_{o \in [-k, k] \times [-k, k]} \langle f_1(x_1 + o), f_2(x_2 + o) \rangle \tag{1}$$

式中 o ——计算区域

k ——计算区域边长的 1/2

每个图像块是边长为 $K = 2k + 1$ 的正方形。两帧之间计算相关性的区域被限制在一个 $[-k, k] \times [-k, k]$ 的区域内, $C(x_1, x_2)$ 表示 f_1 中 x_1 处特征与 f_2 中 x_2 处特征的相似度。当 $k = 0$ 时, $C(x_1, x_2)$ 表示 f_1 中 x_1 处特征向量和 f_2 中 x_2 处特征向量的点乘运算。

向 FlowNetCorr 网络输入两帧连续的待求解图像 1 和图像 2, 由上一层网络估计的光流对图像 2 扭曲变换得到连续图像的亮度差, 融合网络将每组图像预测的光流场作为输入, 对大、小位移网络结果进行卷积操作, 最终得到光流图像。

奶牛反刍时其头部无规则运动, 如摆头、低头等, 造成 FlowNet 2.0 光流算法生成的光流图像存在大量干扰运动光流, 无法抽取有效的反刍光流。因此, 本文通过改进 FlowNet 2.0 光流算法消除干扰运动对反刍光流的影响。

2 FlowNet 2.0 光流算法改进

为消除牛只自身头部运动与背景干扰对反刍光流特征提取的影响, 首先使用垂直光流分量替代光流速度计算光流, 消除水平运动造成的干扰; 然后设

置光流阈值避免垂直光流中头部运动光流干扰, 生成视频帧间反刍行为光流图像。同时为减小奶牛反刍行为中因嘴巴闭合与张开至最大时光流消失对检测的影响, 设置反刍区域面积阈值准确提取区域内光流数据, 提升检测准确率。最终对反刍运动曲线图滤波拟计算, 准确获取奶牛反刍运动咀嚼频次。

2.1 反刍行为光流图

首先计算两帧视频流间所有像素点的水平光流分量 u 和垂直光流分量 v , 每个像素点在两帧图像间的光流速度 s 为

$$s = \sqrt{u^2 + v^2} \tag{2}$$

每个像素点光流的运动角度 a 为

$$a = \frac{180 \arctan 2(v, u)}{\pi} \tag{3}$$

a 确定不同颜色代表不同运动角度, s 确定颜色强度, 生成奶牛反刍行为光流图, 如图 3 所示。



(a) 原始图像 (b) 光流图

图 3 奶牛反刍行为图像与光流图

Fig. 3 Rumination behavior images of cows and optical flow maps

一次完整的反刍咀嚼运动是从嘴巴闭合到张开至最大再到闭合的垂直上下过程。

牛只自身头部运动与背景运动可拆分为水平方

向与垂直方向两部分,为避免背景与自身运动对光流分析影响,分别从两个方向的运动分量上对反刍行为光流进行计算。定义 T 为光流图像,利用 FlowNet 2.0 光流算法计算得到光流图像 T , T 由 a 和 s 共同决定。

为减少 s 中水平方向运动分量 u 对反刍行为特征提取的影响,将光流速度 s 替换为各像素点的垂直方向光流分量 v 的绝对值 $|v|$ 。

为减少垂直方向运动分量 $|v|$ 中其他运动对反刍行为特征提取的影响,计算奶牛头部区域光流强度均值 $|\bar{v}|$,将其作为光流阈值,过滤小幅度头部运动干扰,保留反刍咀嚼运动光流,改进后效果与 FlowNet 2.0 光流算法的对比如图 4 所示。

从图 4 可以看出,图 4a 中红框标记出的光流区域为头部运动对反刍光流的干扰,改进后的算法有效剔除因头部运动产生的干扰光流,留下嘴部区域反刍光流。

2.2 反刍咀嚼频次计算

反刍区域为二值化反刍光流图像的最大连通

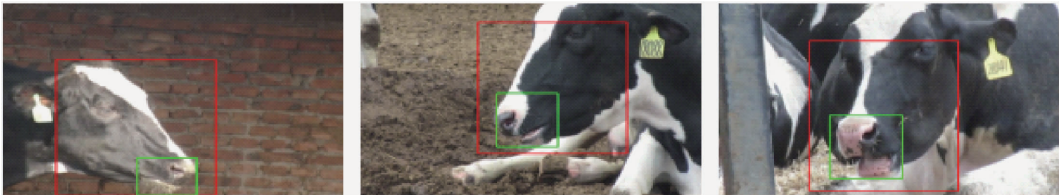


图 5 反刍区域检测结果
Fig. 5 Results of rumination area detection

区域。对二值化反刍光流图腐蚀、膨胀,获得图像最大连通域,计算其外接矩坐标,即为奶牛反刍区域坐标。理想的反刍区域检测结果如图 5 所示。

图 5 中红框为感兴趣区域 (Region of interest, ROI),绿框为检测出的反刍区域。一次完整的反刍

咀嚼运动中,奶牛嘴巴闭合状态与张开至最大时,不会产生光流数据,若此时出现其他剧烈且目标较小运动会影响反刍区域检测。反刍区域检测异常结果如图 6 所示。

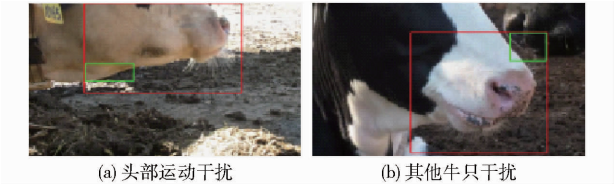


图 6 反刍区域检测异常结果
Fig. 6 Abnormal results of rumination area detection

图 6a 为奶牛嘴巴闭合状态下,颈部运动干扰导致反刍区域检测判断错误;图 6b 为背景有其他牛只闯入造成光流干扰导致反刍区域检测错误。通过设置面积阈值减少嘴巴闭合与张开至最大时对反刍区域检测的干扰,面积阈值 μ 的计算公式为

$$\mu = \frac{S}{(y_2 - y_1)(x_2 - x_1)} \tag{4}$$

式中 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) ——ROI 框的左上顶点、右下顶点坐标

S ——检测得到的反刍区域面积

分析反刍区域内咀嚼频次,计算区域 S 内光流数据均值 \bar{v} ,计算公式为

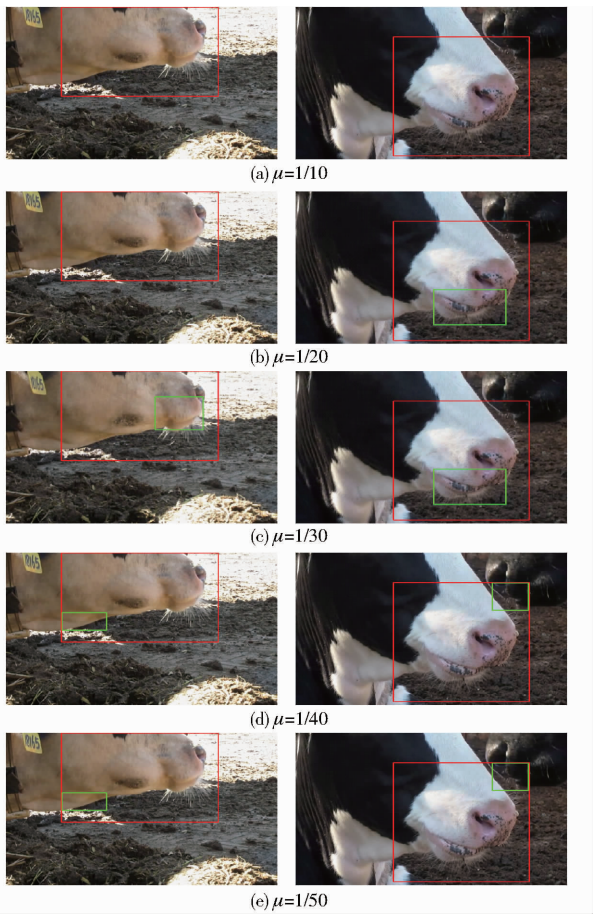


图 7 不同面积阈值的反刍区域检测结果

Fig.7 Rumination area detection results of different area thresholds

$$\bar{v} = |v|_s \quad (5)$$

式中 $|v|$ ——反刍区域内光流速度绝对值

奶牛嘴巴闭合及张开最大导致无法检测到反刍区域时,ROI 内光流数据均值计算公式为

$$\bar{v} = |v|_{ROI} \quad (6)$$

设定横坐标为视频帧序列,纵坐标为光流数据的反刍运动曲线,归一化后使用 Savitzky - Golay 滤波器减少奶牛头部其他运动造成的噪声影响。由于滤波后反刍运动曲线呈现正弦分布波峰波谷,定义拟合函数 y ,公式为

$$y = a_0 \sin(a_1 x + a_2) + a_3 \quad (7)$$

式中 a_0, a_1, a_2, a_3 ——拟合得出的变量

拟合函数的极大值点 h 可通过二阶导数计算得出,遍历曲线统计极大值点个数 h ,即为输入视频的奶牛反刍咀嚼次数 d ,令 t 为输入视频的时间,反刍咀嚼频次 p 的计算公式为

$$p = \frac{d}{t} \quad (8)$$

3 试验与结果分析

3.1 试验数据集和参数设置

本文试验基于 Windows 操作系统、Pytorch 框

架,其中 Python 版本为 3.6,Pytorch 版本为 1.0.1, CUDA API 版本为 10.0,Cudnn 版本为 7.4.1。选取 9 头奶牛的 15 段视频作为试验数据集,随机选取不同场景下 11 头奶牛的 15 段视频作为测试数据集。部分视频图像如图 8 所示。



图 8 不同场景下奶牛反刍视频图像

Fig.8 Cow rumination video in different scenes

3.2 试验分析

为验证改进 FlowNet 2.0 光流算法的有效性,在相同设备、相同算法环境下,对比 FlowNet 2.0 光流算法与改进后算法的反刍行为光流曲线,其中以视频帧序号作为横坐标,光流速度均值作为纵坐标,如图 9 所示。

由图 9 可以看出,改进 FlowNet 2.0 光流算法相较于 FlowNet 2.0 光流算法曲线更具规律性、周期性,波峰波谷更为分明。如图 9a 中一次反刍运动周期内波峰往往会出现多次(图中红圈标出),难以实现曲线波峰波谷的计数。出现该现象的原因是 FlowNet 2.0 光流算法计算光流速度 s 没有对头部运动与背景干扰进行处理,导致曲线中参杂其他运动噪声干扰,波峰波谷不明显。改进后算法计算垂直光流速度 v ,避免了水平方向运动的干扰,且通过阈值的设置成功过滤掉垂直方向奶牛头部小幅度运动干扰,使得曲线周期性明显。如图 9b 所示,算法结果中一次反刍运动周期内仅出现一次波峰,保证了反刍咀嚼次数计数的准确性。

为进一步验证算法的反刍区域面积阈值设置与滤波曲线拟合过程对算法准确率的提升效果,对比 FlowNet 2.0 光流算法与改进 FlowNet 2.0 光流算法的滤波效果图,如图 10 所示。

在图 10 中,通过比对同一数据集的滤波曲线(如图 10c、10d),该数据集等 140 帧左右时(图中绿圈标出)奶牛出现短暂低头动作,图 10c 中滤波后曲线波峰波谷不明显,无法确定周期;而图 10d 中滤波

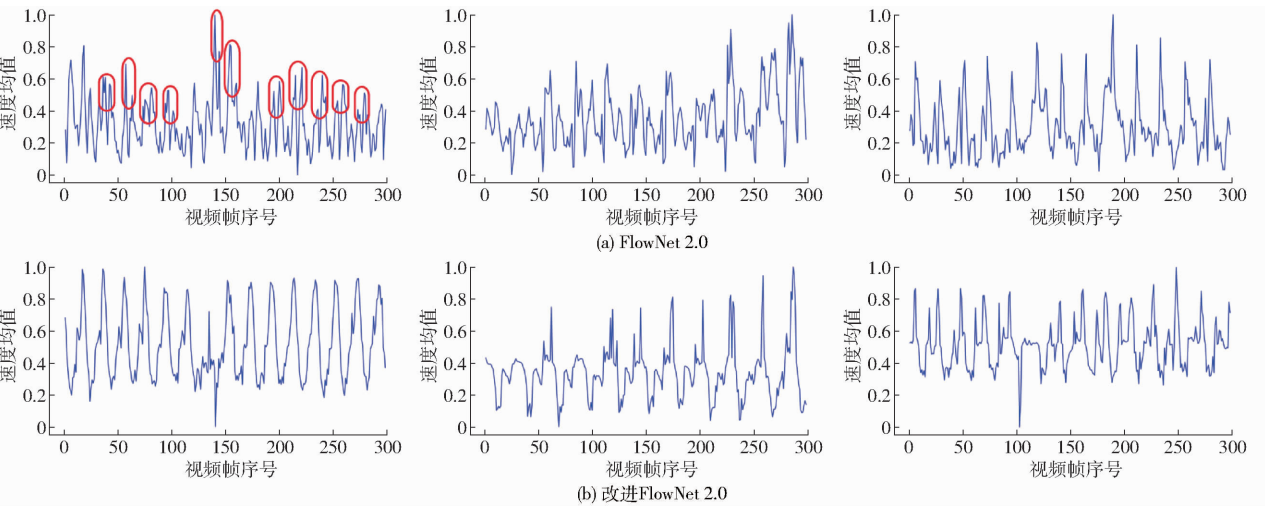


图 9 光流曲线结果对比

Fig. 9 Comparison diagrams of optical flow curve results

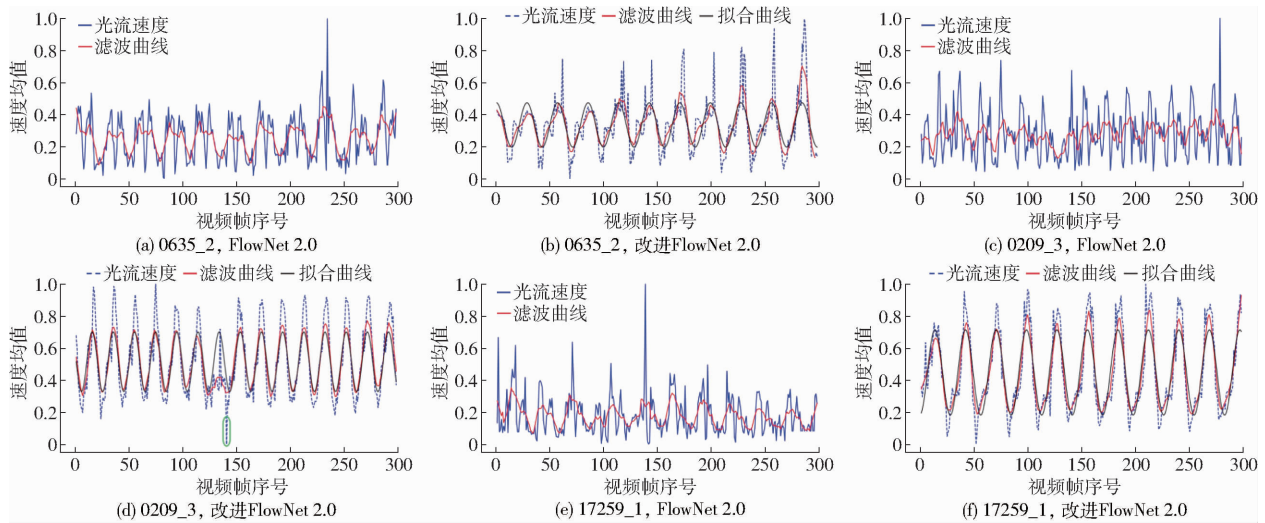


图 10 滤波结果对比

Fig. 10 Comparison diagrams of filtering results

后曲线除第 140 帧左右出现波峰特征不明显外, 总体呈现正弦曲线规律, 利用正弦函数拟合曲线, 滤波后曲线与拟合曲线基本重合, 而拟合曲线在第 140 帧左右波峰明显, 避免了奶牛低头动作带来的光流干扰。由图 10 可知, 反刍区域面积阈值的设置能够有效减少头部等其他运动对反刍光流的影响, 增大波峰波谷间的差值, 使曲线周期性更为明显, 有效避免滤波曲线有少部分区域出现周期缺失的现象, 确保算法鲁棒性。

为验证改进 FlowNet 2.0 光流算法获取到的奶牛反刍咀嚼次数准确性, 对比 FlowNet 2.0 光流算法和改进算法的反刍咀嚼次数误检率, 如表 1 所示。

由表 1 可知, FlowNet 2.0 光流算法反刍咀嚼次数检测准确率为 93.64%, 改进 FlowNet 2.0 光流算法的反刍咀嚼次数检测准确率为 99.39%, 比改进前提升 5.75 个百分点。为了进一步验证改进 FlowNet 2.0 光流算法的稳定性与鲁棒性, 采用新

表 1 不同方法计算奶牛反刍咀嚼次数对比

Tab. 1 Comparative of different methods for calculating rumination times of dairy cows

奶牛编号	实际值	改进前 算法计 算值	反刍咀 嚼次数	改进后 算法计 算值	反刍咀 嚼次数	备注
			误检率/ %	误检率/ %	误检 率/%	
0209_3	15	14	6.67	15	0	
0635_2	10	10	0	10	0	
0635_5	11	11	0	11	0	
0635_6	11	11	0	11	0	
7078_3	13	13	0	13	0	
17259	11	11	0	11	0	
17259_1	11	10	9.09	12	9.09	反刍停顿
19009_1	12	11	8.33	12	0	
19212_1	12	12	0	12	0	
21029_2	13	13	0	13	0	
18165_4	11	13	18.18	11	0	
18182_2	12	13	8.33	12	0	
19212_3	13	12	7.69	13	0	
21029_3	14	13	7.14	14	0	
18165_2	10	13	30.00	10	0	
平均值			6.36		0.61	

的测试试验数据验证改进 FlowNet 2.0 光流算法的反刍咀嚼次数与反刍咀嚼次数误检率,如表 2 所示。

表 2 奶牛反刍咀嚼次数检测结果

Tab.2 Testing results rumination times of dairy cows

奶牛编号	反刍咀嚼次		反刍咀嚼次 数误检率/%	备注
	数实际值	法计算值		
0587_2	10	1	90.00	头部运动剧烈
0587_3	10	10	0	
17105_1	12	12	0	
17105_2	13	13	0	
17213_2	11	11	0	
17213_3	11	11	0	
18088_2	14	14	0	
18134_2	12	12	0	
18165_3	12	12	0	
19004_2	11	11	0	
19093_1	10	10	0	
19117_2	12	12	0	
21090_1	13	13	0	
28141_5	13	13	0	
28141_7	13	13	0	
平均值			6.00	

由表 2 可知,除 0587_2 编号奶牛头部运动剧烈,造成反刍咀嚼次数检测误检率较高外,其余样本反刍咀嚼次数均检测正确。改进 FlowNet 2.0 光流

算法在新的测试试验数据中仍保持较高反刍咀嚼次数检测准确率,验证了改进 FlowNet 2.0 光流算法的稳定性与鲁棒性。

4 结束语

为改善反刍过程中头部运动与背景牛只运动对反刍行为分析的影响,本文提出了一种改进 FlowNet 2.0 光流算法的奶牛反刍行为分析方法,利用垂直光流分量替代光流速度计算光流图,消除水平运动对光流分析干扰;设置光流阈值避免垂直光流中头部运动光流干扰;二值化检测奶牛反刍区域进一步消除背景运动影响;设置反刍区域面积阈值准确提取区域内光流数据,避免反刍光流消失时头部运动与闯入牛只影响;滤波拟合计算反刍曲线,增大波峰波谷差值,保证曲线周期性与算法鲁棒性,准确得到奶牛反刍咀嚼频次信息。试验结果证明,改进 FlowNet 2.0 光流算法反刍咀嚼频次计算准确率达到 99.39%,相较于 FlowNet 2.0 光流算法准确率提升 5.75 个百分点。且改进后的光流算法避免了牛只自身头部运动与背景干扰对反刍光流特征提取的影响,解决了奶牛反刍行为中因嘴巴闭合与张开至最大导致反刍光流消失时头部运动干扰问题,确保算法准确率,为群体养殖模式下奶牛反刍行为的智能监测分析提供技术支撑。

参 考 文 献

[1] 王硕,胡凤明,刁其玉,等. 奶牛反刍行为调控机制研究进展[J]. 动物营养学报,2021,33(4):1869-1879.
WANG Shuo, HU Fengming, DIAO Qiyu, et al. Research progress on regulatory mechanism of ruminant behavior in dairy cows [J]. Journal of Animal Nutrition, 2021,33(4): 1869-1879. (in Chinese)

[2] 和东迁,陶金忠. 反刍动物剩余采食量在瘤胃功能上的差异和相关分子生物学机制[J]. 动物营养学报,2021,33(6): 3125-3131.
HE Dongqian, TAO Jinzhong. Differences in ruminant remaining feed in rumen function and related molecular biological mechanisms[J]. Journal of Animal Nutrition, 2021,33(6): 3125-3131. (in Chinese)

[3] 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.

[4] BAUERMANN F V, JOSHI L R, MOHR K A, et al. A novel bovine papillomavirus type in the genus Dyokappapapillomavirus [J]. Archives of Virology,2017,162(10):3225-3228.

[5] 冯妍,高志天,郑炜缤,等. 机器学习在奶牛临床疾病预测中的应用[J]. 动物医学进展,2021,42(6):115-119.
FENG Yan, GAO Zhitian, ZHENG Weibin, et al. Application of machine learning in clinical disease prediction of dairy cows [J]. Advances in Animal Medicine, 2021,42(6): 115-119. (in Chinese)

[6] KRAUSE K M, COMBS D K, BEAUCHEMIN K A. Effects of forage particle size and grain fermentability in midlactation cows. I. Milk production and diet digestibility[J]. Journal of Dairy Science,2002,85(8):1936-1946.

[7] 邵大富. 奶牛反刍行为变化规律及其影响因素的相关性研究[D]. 长春:吉林大学,2015.
SHAO Dafu. Study on ruminant behavior and its influencing factors in dairy cows[D]. Changchun: Jilin University, 2015. (in Chinese)

[8] 梁高洋,李永,白东宁,等. 反刍动物淀粉营养研究进展[J]. 家畜生态学报,2021,42(6):7-12,18.
LIANG Gaofeng, LI Yong, BAI Dongning, etc. Advances in starch nutrition in ruminants[J]. Journal of Livestock Ecology, 2021,42(6): 7-12,18. (in Chinese)

[9] STONE A E, JONES B W, BECKER C A, et al. Influence of breed, milk yield, and temperature-humidity index on dairy cow lying time, neck activity, reticulorumen temperature, and rumination behavior[J]. Journal of Dairy Science,2017,100(3): 2395-2403.

[10] KAUFMAN E I, ASSELSTINE V H, LEBLANC S J, et al. Association of rumination time and health status with milk yield and composition in early-lactation dairy cows[J]. Journal of Dairy Science,2018,101(1):462-471.

- [11] ANTANAITIS R, ZILAITIS V, JUOZAITIENE V, et al. Evaluation of rumination time, subsequent yield, and milk trait changes dependent on the period of lactation and reproductive status of dairy cows[J]. Polish Journal of Veterinary Sciences, 2018,21(3):567–572.
- [12] 熊安然,王慧,吴富鑫. 围产期奶牛产奶量与反刍时间、活动量、体细胞评分的相关关系分析[J]. 动物营养学报,2020,32(11):5293–5301.
XIONG Anran, WANG Hui, WU Fuxin. Correlation analysis between milk production and rumination time, activity and somatic cell score in perinatal dairy cows[J]. Journal of Animal Nutrition, 2020,32(11):5293–5301. (in Chinese)
- [13] ALMEIDA P E, WEBER P S D, BURTON J L, et al. Depressed DHEA and increased sickness response behaviors in lame dairy cows with inflammatory foot lesions[J]. Domestic Animal Endocrinology, 2008,34(1):89–99.
- [14] 司敬方,刘云鹏,董刚辉,等. 利用产前瘤胃反刍时间预测奶牛围产期酮病风险[J]. 中国农业大学学报,2019,24(8):78–87.
SI Jingfang, LIU Yunpeng, DONG Ganghui, et al. Prenatal ruminant time was used to predict the risk of perinatal ketosis in dairy cows[J]. Journal of China Agricultural University, 2019,24(8):78–87. (in Chinese)
- [15] 包玉亭,陈雪峰,张立. 奶牛反刍障碍疾病的鉴别诊断探析[J]. 农业开发与装备,2016(1):164,159.
- [16] 王宏. 奶牛反刍障碍疾病的鉴别诊断[J]. 畜牧兽医科技信息,2015(5):74.
- [17] 常胜,唐守营. 反刍家畜前胃弛缓及相关疾病的诊断与防治[J]. 畜牧兽医科技信息,2013(5):50–51.
- [18] BAHRAM C. Evaluation of n-carbamoylglutamate as arginine enhancer and its effect on rumen fermentation, lactation performance and nitrogen utilization in high yielding lactating dairy cows[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [19] 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(4):47–51,164–165.
WANG Liwei, XIE Qiuju, LIU Honggui, et al. A wearable monitoring device for ruminant behavior of dairy cows based on multisource information perception[J]. Heilongjiang Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2019(4):47–51,164–165. (in Chinese)
- [20] 张小栓,张梦杰,王磊,等. 畜牧养殖穿戴式信息监测技术研究现状与发展分析[J]. 农业机械学报,2019,50(11):1–14.
ZHANG Xiaoshuan, ZHANG Mengjie, WANG Lei, et al. Research status and development analysis of wearable information monitoring technology in animal husbandry[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(11):1–14. (in Chinese)
- [21] 秦立峰,张晓茜,董明星,等. 基于多特征融合相关滤波的运动奶牛目标提取[J]. 农业机械学报,2021,52(11):244–252.
QIN Lifeng, ZHANG Xiaoxi, DONG Mingxing, et al. Target extraction of moving cows based on multi-feature fusion correlation filter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(11):244–252. (in Chinese)
- [22] 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. Multiobjective ruminant behavior monitoring for dairy cows based on video analysis[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(18):211–218. (in Chinese)
- [23] ANDRIAMASINORO L, LEBEAU F, BECKERS Y, et al. Development of an open-source algorithm based on inertial measurement units (IMU) of a smartphone to detect cattle grass intake and ruminating behaviors[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017,139:126–137.
- [24] 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 & Biological Engineering, 2017,10(5):194–202.
- [25] REITER S, SATTLECKER G, LIDAUER L, et al. Evaluation of an ear-tag-based accelerometer for monitoring rumination in dairy cows[J]. Journal of Dairy Science, 2018,101(4):3398–3411.
- [26] 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-objective teat tracking and ruminant monitoring using Kalman filter and Hungarian algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2021,37(19):192–201. (in Chinese)
- [27] 宋怀波,吴頔华,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. Breathing behavior detection of dairy cows based on Lucas-Kanade sparse optical flow algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2019,35(17):215–224. (in Chinese)
- [28] 李通. 基于视频分析的多目标奶牛反刍行为监测方法研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2019.
LI Tong. Study on multi-objective ruminant behavior monitoring method for dairy cows based on video analysis[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019. (in Chinese)
- [29] 段恩泽,王粮局,雷逸群,等. 基于实例分割和光流计算的死兔识别模型研究[J]. 农业机械学报,2022,53(2):256–264,273.
DUAN Enze, WANG Liangju, LEI Yiqun, et al. Dead rabbit recognition model based on instance segmentation and optical flow calculating[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(2):256–264,273. (in Chinese)