

循环水养殖游泳型鱼类摄食活动强度评估方法研究

赵建¹ 朱松明¹ 叶章颖¹ 刘鹰² 李勇³ 卢焕达⁴

(1. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058; 2. 大连海洋大学海洋科技与环境学院, 大连 116034;
3. 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071; 4. 浙江大学宁波理工学院, 宁波 315100)

摘要: 针对循环水养殖游泳型鱼类过程中的高效投喂难题进行了研究,以罗非鱼为实验对象,提出了一种基于改进动能模型的鱼群摄食活动强度评估方法。该方法避免了鱼群目标的前景提取和对鱼群内个体的跟踪,直接以由鱼群摄食活动引起的水面反光区域变化特征为关键因素进行分析。首先,在 HSV 色彩空间下对水面反光区域进行分割、提取;其次,利用 Lucas-Kanade 光流、统计学方法以及信息熵对反光区域变化的不规则程度进行计算和分析;最后,结合反光区域的变化幅度信息实现对鱼群摄食活动强度的评估。通过实验结果对比分析可知,所提方法在单轮多次饱食投喂(间隔时间(40±2) s)下针对不同肠胃饱满指数(20.35±10、150.61±10)的罗非鱼均能较好地描述鱼群摄食活动强度。

关键词: 游泳型鱼类; 循环水养殖; 摄食活动强度; 改进动能模型

中图分类号: S964.9; S965.125 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)08-0288-06

Assessing Method for Feeding Activity of Swimming Fishes in RAS

Zhao Jian¹ Zhu Songming¹ Ye Zhangying¹ Liu Ying² Li Yong³ Lu Huanda⁴

(1. College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

2. School of Marine Science and Technology and Environment, Dalian Ocean University, Dalian 116034, China

3. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

4. Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, China)

Abstract: The problem of effective feeding for swimming fishes in recirculating aquaculture system (RAS) was studied. In order to solve this problem, a novel assessing method for the feeding activity of shoal was proposed with the help of *tilapia* which was used as the experimental objective, and the proposed method was based on the improved kinetic energy model. Instead of the complex segmentation of foreground of shoal and the tracking of individuals among shoals, the change characteristics of reflective areas of water surface caused by feeding activity of shoal were regarded directly as the key factor in this method. Firstly, the reflective areas of water surface were segmented and extracted in HSV-based color space. Then, with the help of the Lucas-Kanade optical flow, statistics method and entropy, the disorder degree of the change in reflective areas was calculated and analyzed. Finally, combined with information of the changing magnitude of reflection areas, the intensity assessment of feeding activity of shoal was executed. According to the comparison and analysis of the experimental results, the proposed method showed good description in intensity of feeding activity of shoal with different digesta index of stomach and bowels (20.35±10, 150.61±10) under strategy of over-satiation feeding through intermittent feeding at intervals of (40±2) s.

Key words: swimming fishes; recirculating aquaculture system; feeding activity; improved kinetic energy model

收稿日期: 2016-01-22 修回日期: 2016-02-25

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAD08B09)和江苏省重点研发计划项目(BE2015325)

作者简介: 赵建(1990—),男,博士生,主要从事精准水产养殖技术研究,E-mail: jsjsjzp@163.com

通信作者: 叶章颖(1982—),男,副教授,博士生导师,主要从事设施水产养殖工程技术与装备研究,E-mail: yzyzju@zju.edu.cn

引言

我国作为水产养殖大国,养殖水产品总量位居世界第一^[1]。据中国渔业统计年鉴调查显示,2014 年我国水产品养殖总量达到 4 748.41 万 t,约占国内水产品生产总量的 73.49%,而游泳型鱼类在其中占有很大的比重^[2]。目前,鱼类养殖主要以池塘养殖为主,但随着土地和水资源的日益匮乏以及环境污染带来的压力,高效环保的循环水养殖模式已逐渐成为趋势^[3]。近年来循环水养殖中鱼类的福利化问题愈发受到重视,其中以基于投喂的营养供给问题尤为关注,饥饿和过分饱食都会引起养殖对象的疾病爆发。其次,饲料成本是整个养殖成本的重要组成部分,提高饲料利用率对增加养殖效益有着重要的作用。另外,残饵和排泄物也影响着鱼类自身生活的水环境^[4-5]。因此如何高效甚至精准投喂成为目前研究的热点和难点。

有关投喂技术的研究都集中在定时投喂、选择性地停止投喂上(即基于摄食节律的单轮多次投喂策略)。文献[6-10]报道了相关技术,但这些技术都是入侵式的,对鱼类活动会造成影响;且其对仪器本身质量要求较高,易损耗;更为重要的是其检测区域也是局部的,无法适用于循环水养殖系统(Recirculating aquaculture system, RAS)中全局(多点)投喂形式。

利用计算机视觉技术对鱼群行为进行分析是一种自动、非入侵式、经济且有效的方法^[11]。但一般其首先需要精确地检测运动目标的位置,并实现运动目标的准确跟踪,鱼跟踪的精确程度直接影响行为分析的结果。然而,目前对于群体运动目标的跟踪很困难,运动群体中多目标跟踪的鲁棒性和可靠性在计算机视觉领域仍然是一个挑战^[12]。为此,乔峰等^[13]利用简单图像处理方法对网箱养殖鲈鱼的摄食活动特征进行量化,通过对摄像机视野范围内摄食鱼群的个体数量进行识别,从而实现鱼群摄食激烈程度的衡量,该方法避免了个体追踪,却未考虑鱼群摄食时溅起的水花以及个体重叠等因素的干扰。LIU 等^[14]通过帧间差分法对循环水养殖大西洋鲑鱼群的摄食活动进行分析,免去了对个体追踪的繁琐,但该方法以帧间差分值为参考依据,精度不足,且其忽略了由鱼群摄食活动引起的水面反光因素,更重要的是,该方法需要事先对前后 2 帧图像中肉眼可见的鱼的个体数进行判断,这在实际应用中是繁琐且难以实现的。

动能(Kinetic energy)模型是一种基于光流法、用于衡量目标运动状态的模型^[15]。而光流法实际

是通过检测图像像素点的强度随时间的变化进而推断出物体移动速度及方向的方法,能够实现对于运动目标的检测,提取目标运动矢量,避免对目标的跟踪^[16]。目前,动能模型主要用于人群异常行为的检测^[15, 17-18],而其在鱼类精准投喂方面的应用还未见报道。因此,本文以罗非鱼(典型的游泳型鱼类)为实验对象,从 RAS 实际养殖角度出发(高密度、多点投喂),结合游泳型鱼类的摄食特性,在无需对鱼群目标进行前景提取的基础上利用改进动能模型对因由鱼群摄食活动而引起的水面反光区域的变化特征(基于单轮多次投喂策略)进行分析,并结合罗非鱼肠胃饱满指数实现对罗非鱼鱼群摄食活动强度的评估。

1 材料与方法

1.1 实验材料

本实验中所涉及的罗非鱼苗均购自浙江 North Supreme Seafood 公司。所购鱼苗在实验室 RAS 中暂养 60 d,使其适应实验室 RAS 养殖环境。实验时罗非鱼数目为 60 条,质量为 (60 ± 10) g。在暂养以及实验期间,投饲方面:罗非鱼每天饱食投喂 3 轮(00:00、08:00、16:00),每轮分 n 次投喂(n 由罗非鱼鱼龄决定),每次投喂间隔 (40 ± 2) s,每次投喂饲料量为 (10.8 ± 0.4) g;光照方面:LED 照明灯模拟光照周期(06:00—18:00 白昼,18:00—06:00 黑夜)。

本实验中所投喂饲料均为浮性饲料,采购于海南通威股份有限公司。

1.2 实验系统

1.2.1 RAS 结构

本实验涉及的 RAS(图 1)主要包括:循环水养殖池(半径:1 m;水位高度: (43 ± 2) cm)、粪便收集器、固液分离器、蛋白分离器、生物滤池、水泵、紫外杀菌灯。循环水中溶解氧由直接充入生物滤池中工业纯氧提供。在整个暂养以及实验过程中,养殖池内溶解氧(DO)保持在 (6.5 ± 0.5) mg/L,氨氮(TAN)在 0.6 mg/L 以内,化学需氧量(COD)在 1.5 mg/L 以内;水温、pH 值和水体流量分别控制在 (27 ± 2) °C、 7.8 ± 0.3 和 (500 ± 10) L/h。

1.2.2 计算机视觉系统

本实验所涉及计算机视觉系统主要包括:视频采集系统(Dell 服务器:CPU Xeon X5650,频率 2.66 GHz,内存 24 GB;海康威视 CCD 高清摄像机:DS-2CD6233F-SDI 型)、照明系统(今台 LED)和投喂系统。视频采集系统中,摄像机安装在养殖池正上方,距水面 1.2 m;其采集图像为 24-bit RGB、

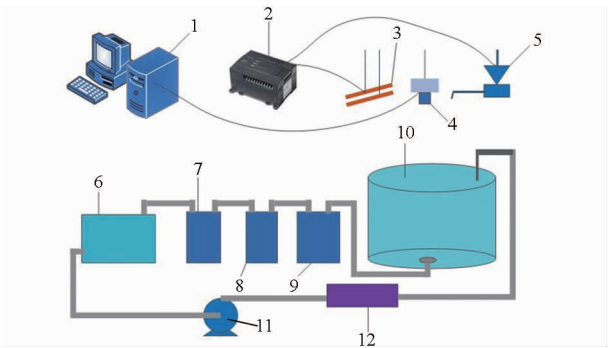


图 1 实验系统装置图

Fig. 1 Apparatus schematic of experimental system
1. 服务器 2. PLC 3. LED 4. 摄像机 5. 投喂装置 6. 生物滤池 7. 蛋白分离器 8. 固液分离器 9. 粪便分离器 10. 养殖池 11. 水泵 12. 紫外杀菌灯

1 080 × 1 920 真彩图像,采集速率为 25 帧/s。照明系统和投喂系统中,LED 照明灯和投喂装置均由 PLC(三菱 FX2N)控制;且为保证光源的柔和性,照明灯两侧用柔光布进行覆盖。

1.3 肠胃饱满指数测定

本文中涉及的实验是基于罗非鱼肠胃排空的,实验中除实验池外另设置 3 个平行对照池用于罗非鱼肠胃饱满指数(Digesta index of stomach and bowels, DI)的测定^[19]。实验开始前,将鱼保持饥饿 36 h,以便充分排空各自胃肠中的内容物。实验期间,实验鱼在同一时间段统一饱食投喂一次,并在饱食投喂后每间隔 1 h 分别对实验池、平行对照池进行饱食投喂实验。每次饱食投喂时,实验池上方摄像机记录当前鱼群摄食行为的同时,每个平行对照池中随机捞出 3 尾罗非鱼放入已溶解有 MS222 水溶液的塑料桶中进行深度麻醉(防止解剖时实验鱼胃肠蠕动导致解剖结果产生误差);然后将 9 尾

鱼单独称量(鱼体湿质量 M_i),冰盘上解剖,取出胃和肠中的内含物,60℃ 干燥至质量恒定,继而称量(肠胃内含物干质量 N_i),最后计算出每尾鱼的肠胃饱满指数,并取其平均值,公式为

$$D_t = \frac{\sum_{i=1}^9 \frac{N_i}{M_i} \times 100}{9} \tag{1}$$

整个实验周期中,实验池和对照池中的鱼数是恒定不变的;每当对照池中有鱼被捞出时,3 条同样状态的罗非鱼将被添入相应对照池。

2 鱼群摄食活动强度分析

目前针对鱼类行为的大部分研究都是在对鱼群目标前景提取的基础上^[13-14, 20],但在实际养殖中,由于现场养殖环境的复杂性(灯光昏暗、鱼群多层次分布、水体浑浊等)以及养殖对象自身的体色变化(鱼体色会趋向养殖池池壁颜色变化,从而增加计算机识别鱼群目标的难度)^[11, 21],使得基于稳定背景去除的鱼群目标分割往往较难实现。经过长期实验观察,由鱼群摄食活动引起的水面反光区域的变化特征能在一定程度上反映鱼群摄食活动的强度。因此,本文从养殖水体的水面反光区域变化特征角度进行鱼群摄食活动强度的分析。

2.1 反光区域的提取

图 2 为反光区域分割流程。首先将实验图像由 RGB 色彩空间转换为 HSV 色彩空间,并分别提取其在 S 分量(饱和度)和 V 分量(亮度)下的色彩分量,通过图 2c 和图 2d 的对比可以看出,反光区域的饱和度很低而亮度很高。因此针对这一特性,对反光区域进行分割、提取,公式为

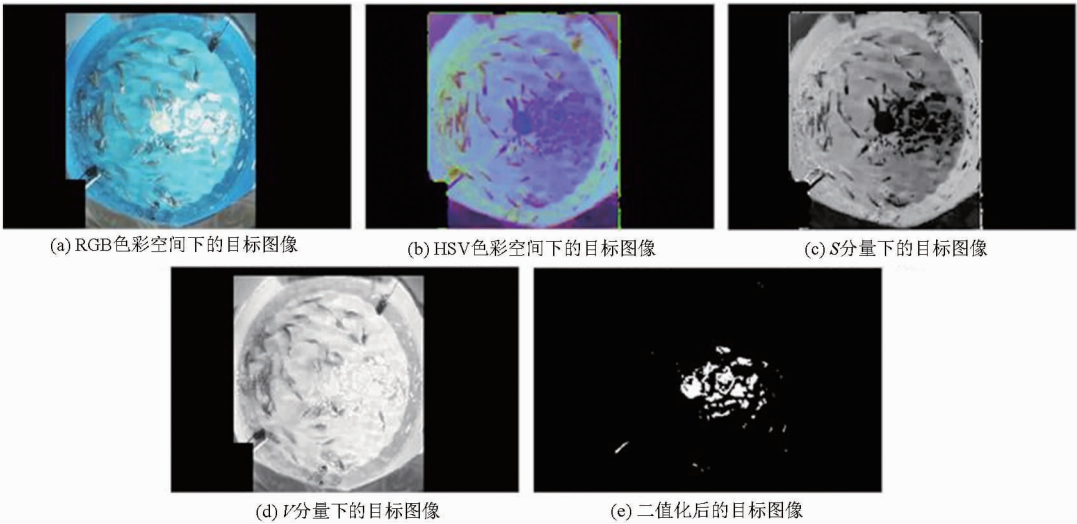


图 2 反光区域分割流程

Fig. 2 Segmentation procedure of reflective areas

$$f(x, y) = \begin{cases} 1 & (I_s(x, y) < T_s \text{ 且 } I_v(x, y) > T_v) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $I_s(x, y)$ 和 $I_v(x, y)$ 分别表示图像在 (x, y) 处的饱和度和亮度, T_s 和 T_v 分别为饱和度阈值和亮度阈值, $f(x, y)$ 表示经二值化处理之后像素点 (x, y) 的取值(图 2e)。本实验中, 为取得较明显效果, 将 T_s 和 T_v 分别设为 0.1 和 0.9。

2.2 基于改进动能模型的鱼群摄食活动强度分析

动能模型最初是由 ZHONG 等^[15]提出的, 后经不断改进形成了以目标聚集程度和目标运动速度为主要参考因素的模型。但在实际 RAS 中, 为防止鱼群争食时的过度拥挤, 饲料往往是全局或者多点抛洒的, 因此养殖对象的聚集程度并不明显。并且, 该分析也是建立在目标前景分割的基础上的。因此, 针对 RAS 实际养殖特点, 提出了一种针对游泳型鱼类摄食活动强度分析的改进动能模型

$$E_K = C_E v^2 \quad (3)$$

式中 C_E ——目标(反光)区域变化的不规律程度

v ——目标(反光)区域的变化速度

E_K ——鱼群运动动能

2.2.1 基于光流法和信息熵的目标变化特征信息提取

鱼群的不规律运动程度主要体现在其运动速度和运动方向上^[20], 因此本文利用光流法对由鱼群运动而产生的水面反光区域变化特征(即像素点的运动速度)进行提取(运动方向上的变化在本实验中并不明显)。

BARRON 等^[22]对多种光流技术的性能进行了比较, 发现相较于其他光流算法, 基于局部差分方法的 Lucas-Kanade 光流算法^[23]是最精确和可靠的。Lucas-Kanade 光流算法是一种固定数量帧差分的光流估计算法, 该算法假设在一个小的空间窗口内的光流保持恒定, 可以根据实际视频图像自行设定光流计算窗口的大小, 所以该算法仅需要跟踪少量的特征点, 计算量较小并且应用灵活。本文采用 Lucas-Kanade 光流算法对由式(2)获得的水面反光区域进行分析并得到其运动信息, 图 3 所示为一个通过对连续 2 帧视频图像进行计算得到的光流矢量场的例子(考虑到视图效果, 图中光流矢量场是每隔 15 个像素点计算出来的)。

设连续 2 帧图像之间的光流为 F , 则目标区域的变化幅度表示为

$$v = \sum_{m=1}^{1080} \sum_{n=1}^{1920} |F(m, n)| \quad (4)$$

速度直方图是一种非参数估计的方法, 本文中

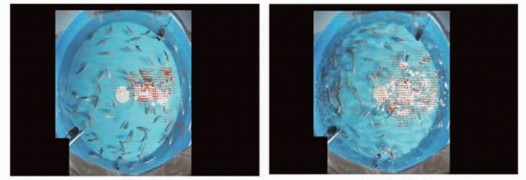


图 3 目标图像的光流矢量场图(红色)

Fig. 3 Optical flow (red) diagrams of experimental image

将变化速度分为若干个角度区间, 然后将连续 2 帧目标图像中的运动矢量速度幅值归类到不同区间进行统计。图 4 为反光区域变化特征统计直方图, 横轴表示变化速度(bl(body length)为一个鱼体长单位^[11]), 纵轴表示不同速度出现的概率, 其计算公式为

$$P(j) = (H(j)/N') \times 100\% \quad (0 \leq j \leq m) \quad (5)$$

其中

$$H(j) = k(j)$$

式中, 把速度的范围分为 m 个区间, k 为落入速度区间内运动矢量个数的统计; N' 是当前帧中非零运动矢量总数, P 为落入速度区间内运动矢量的概率。本文将变化速度统计范围限定在 $0 \sim 1.0$ bl/s 之间, 每隔 0.05 bl/s 进行一次统计, 即 $m = 20$ 。

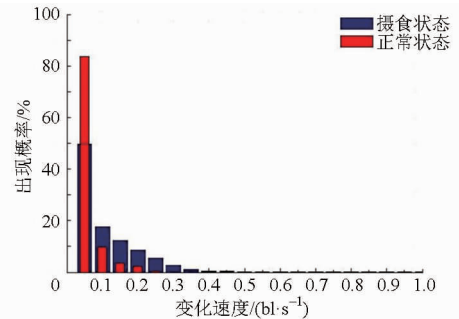


图 4 反光区域变化特征统计直方图

Fig. 4 Statistics histogram of change characteristics of reflective areas

2.2.2 基于信息熵的目标变化不规律程度分析

在统计学中, 信息熵用来衡量不确定度, 熵越大, 则被测变量的无规律程度越高^[24]。在信息理论中, 信息熵被用来判定随机变量的不确定度与无规律性^[25]。因此本文利用信息熵^[26]对水体反光区域变化特征分布概率的无规律程度进行衡量, 从而实现鱼群运动不规律程度的分析, 公式为

$$C_E = - \sum_{j=1}^m P(j) \lg P(j) \quad (6)$$

在式(4)和式(6)的基础上, 鱼群摄食活动强度(式(3))可转换成

$$E_K = C_E v^2 = - \left(\sum_{j=1}^m P(j) \lg P(j) \right) \left(\sum_{m=1}^{1080} \sum_{n=1}^{1920} |F(m, n)| \right)^2 \quad (7)$$

3 实验结果与分析

分别利用本文中提出的改进动能模型,即 E_K 函数(图 5, 基于水面反光区域分割)、针对循环水养殖大西洋鲑智能投喂的 CVFAI 函数(图 6, 基于鱼群目标分割)^[14] 以及针对网箱养殖鲈鱼智能投喂的 SBCS 函数(图 7, 基于鱼群目标分割)^[13] 对 2 种不同肠胃饱满指数(DI1 和 DI2 分别为 150.61 ± 10 和 20.35 ± 10 ; 值越小, 鱼群饥饿程度越高)下的罗非鱼鱼群在单轮多次饱食投喂策略下所表现出来的摄食活动强度进行仿真模拟(重复实验取平均值, 仿真环境为 Matlab 2013a)。

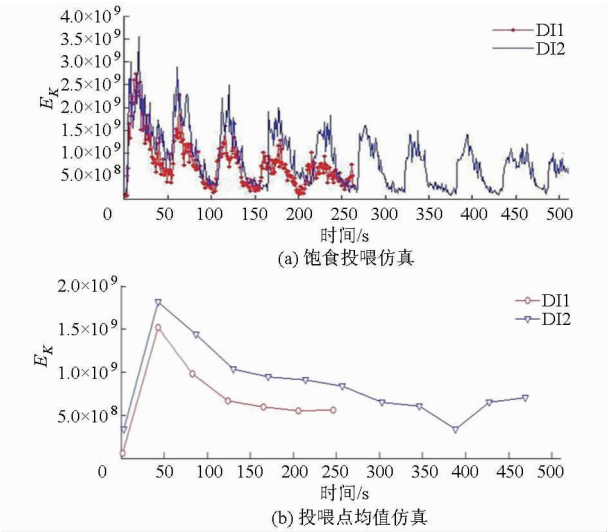


图 5 基于 E_K 函数的鱼群摄食活动强度仿真
Fig. 5 Simulation of feeding activity of shoal based on E_K function

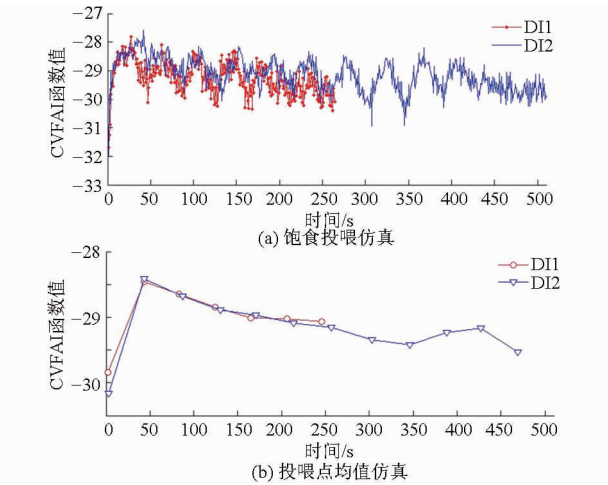


图 6 基于 CVFAI 函数的鱼群摄食活动强度仿真
Fig. 6 Simulation of feeding activity of shoal based on CVFAI function

图 5b、6b、7b 分别为图 5a、6a、7a 相应投喂点的均值仿真, 即除第 1 个投喂点外, 其余每个投喂点的取值为前一个投喂点至当前投喂点之间的摄食强度均值。

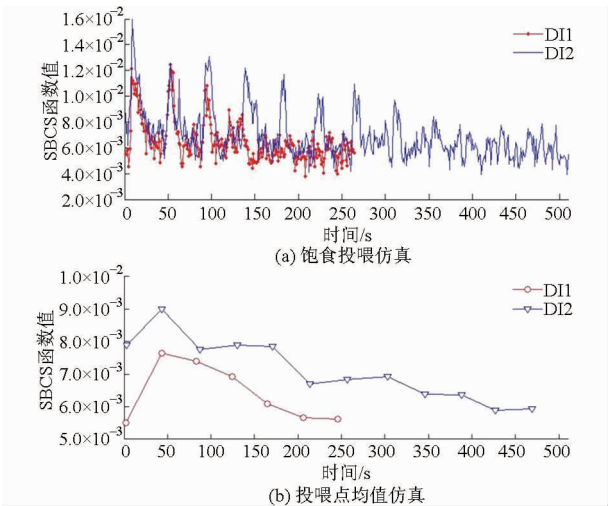


图 7 基于 SBCS 函数的鱼群摄食活动强度仿真
Fig. 7 Simulation of feeding activity of shoal based on SBCS function

通过综合比较可知, 相对于图 5, 虽然图 6 中鱼群在同一肠胃饱满指数下对于单轮多次饱食投喂所表现出的摄食活动强度变化较规律(即随着投喂次数的增加, 摄食活动强度大致呈梯度下降趋势), 但其对于不同肠胃饱满指数下的饱食投喂所表现出的摄食活动强度的变化层次并不明显。而图 7 与图 6 所表现出的特性恰恰相反。造成这一现象的主要原因可能是鱼群在饱食投喂过程中因抢食而形成拥挤, 进而产生强烈的水面波动, 从而形成反光; 而与此同时, 伴随着个体与个体之间的重叠率急剧增加, 从而导致基于鱼群目标分割的 CVFAI 函数^[14] 和 SBCS 函数^[13] 的稳定性降低。而对于图 5, 由于其是针对由鱼群摄食活动引起的水面反光区域的变化特征分析的, 无需对复杂鱼群前景进行识别和提取, 因此基于此的鱼群摄食活动强度分析相对较稳定、可靠。

本实验所设计循环水养殖池中的排水口(含有钢制地漏, 易反光)以及进水管均由白色材料构成, 这在一定程度对养殖池中反光区域的精准分割带来影响, 因此在基于本文所提出的实际养殖中应该尽量避免使用类似白色材料。其次, 本实验中所用罗非鱼均为 60 g 左右, 无论其大小和规模均具备运动时搅动水体以达到水面反光区域剧烈变化的效果。但在实际养殖中, 当养殖对象的大小和规模不足以搅动水体以达到水面反光区域变动时, 本文中所提出的高效投喂策略的可实施性将会降低。更为重要的是, 该方法也是基于养殖对象摄食节律的(即定时投喂), 但鱼类的摄食节律受养殖环境、个体大小以及群体内其他个体行为的影响^[27], 因此, 利用鱼群自身行为信息或者养殖水体场流信息, 探索不完全依赖于养殖对象摄食节律的精准投喂方法将是下

一步研究的重点。

4 结束语

以罗非鱼为实验对象,结合计算机视觉技术和鱼类生理指标对循环水养殖游泳型鱼类中的高效投喂难题进行了研究。在避免了复杂鱼群目标的前景

提取以及鱼群内个体跟踪的基础下,利用改进动能模型对由鱼群摄食活动引起的水面反光区域的变化特征进行量化、仿真。通过对比、分析可知,在单轮多次投喂策略的基础上,本文中所建立方法对不同肠胃饱满指数下的罗非鱼鱼群摄食活动强度均具有较好的描述效果。

参 考 文 献

1 美国科学院国家研究委员会. 鱼类与甲壳类营养需要[M]. 麦康森, 李鹏, 赵建民, 等, 译. 北京:科学出版社, 2015.

2 国家统计局. 2015 中国渔业统计年鉴[J]. 北京: 中国统计出版社, 2015.

3 DALSGAARD J, LUND I, THORARINSDOTTIR R, et al. Farming different species in RAS in Nordic countries: current status and future perspectives[J]. Aquacultural Engineering, 2013, 53: 2 – 13.

4 CHANG C M, FANG W, JAO R C, et al. Development of an intelligent feeding controller for indoor intensive culturing of eel[J]. Aquacultural Engineering, 2005, 32: 343 – 353.

5 HUNTINGFORD F A, ADAMS C, BRAITHWAITE V A, et al. Current issues in fish welfare[J]. Journal of Fish Biology, 2007, 70(4): 1311 – 1316.

6 JUELL J E. Hydro acoustic detection of food waste—a method to estimate maximum food intake of fish populations in sea cages [J]. Aquacultural Engineering, 1991, 10: 207 – 217.

7 JUELL J E, FUREVIK D, BJORDAL Å. Demand feeding in salmon farming by hydro acoustic food detection[J]. Aquacultural Engineering, 1993, 12: 155 – 167.

8 JUELL J E, WESTERBERG H. An ultrasonic telemetric system for automatic positioning of individual fish used to track Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) in a sea cage[J]. Aquacultural Engineering, 1993, 12: 1 – 18.

9 FANG W, CHANG C M. Development of an automatic feeder with the capacity of knowing when to stop feeding[C] //Proceedings of the Annual International Conference on Exposition of the World Aquaculture Society, 1999: 251.

10 FLOOD M J, NOBLE C, KAGAYA R, et al. Growing amago and rainbow trout in duoculture with self-feeding systems: implications for production and welfare[J]. Aquaculture, 2010, 309: 137 – 142.

11 XU J Y, LIU Y, CUI S R, et al. Behavioral responses of tilapia (*Oreochromis niloticus*) to acute fluctuations in dissolved oxygen levels as monitored by computer vision[J]. Aquaculture Engineering, 2006, 35: 207 – 217.

12 DELCOURT J, BECCO C, VANDEWALLE N, et al. A video multitracking system for quantification of individual behavior in a large fish shoal: advantages and limits[J]. Behavior Research Methods, 2009, 41(1): 228 – 235.

13 乔峰, 郑堤, 胡利永, 等. 基于机器视觉实时决策的智能投饵系统研究[J]. 工程设计学报, 2015, 22(6): 528 – 533.

14 LIU Z Y, LIA X, FAN L Z, et al. Measuring feeding activity of fish in RAS using computer vision [J]. Aquacultural Engineering, 2014, 60: 20 – 27.

15 ZHONG Z, YE W, WANG S, et al. Crowd energy and feature analysis [C] //IEEE International Conference on Integration Technology, 2007: 144 – 150.

16 ANDRADE E L, BLUNSDEN S, FISHER R B. Characterisation of optical flow anomalies in pedestrian traffic[C] //The IEE International Symposium on Imaging for Crime Prevention and Detection, 2005: 73 – 78.

17 CAO T, WU X Y, GUO J N, et al. Abnormal crowd motion analysis [C] // Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2009: 1709 – 1714.

18 GUO G X, JUN C, XIN Y W, et al. An energy model approach to people counting for abnormal crowd behavior detection[J]. Neurocomputing, 2012, 83: 121 – 135.

19 董桂芳, 杨严鸥, 陈路, 等. 斑点叉尾和杂交鲟幼鱼昼夜摄食节律和胃肠排空时间的研究[J]. 水生生物学报, 2013, 37(5): 876 – 884.

DONG G F, YANG Y O, CHEN L, et al. Diet feeding rhythm and gastrointestinal evacuation time of juvenile channel catfish and hybrid sturgeon[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2013, 37(5): 876 – 884. (in Chinese)

20 于欣, 侯晓娇, 卢焕达, 等. 基于光流法与特征统计的鱼群异常行为检测[J]. 农业工程学报, 2014, 30(2): 162 – 168.

21 PARSONAGE K D, PETRELL R J. Accuracy of a machine-vision pellet detection system[J]. Aquacultural Engineering, 2003, 29: 109 – 123.

22 BARRON J L, FLEET D J, BEAUCHEMIN S S. Performance of optical flow techniques[J]. International Journal of Computer Vision, 1994, 12(1): 43 – 77.

23 LUCAS B D, KANADE T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision[C] // Proceedings of Imaging Understanding Workshop, 1981: 121 – 130.

24 SETHNA J P. Statistical mechanics: entropy, order parameters, and complexity [M]. New York: Oxford University Press, 2006.

25 BIAYNICKI-BIRULA I, MYCIELSKI J. Uncertainty relations for information entropy in wave mechanics[J]. Communications in Mathematical Physics, 1975, 44(2): 129 – 132.

26 JIANG A H, HUANG X C, ZHANG Z H, et al. Mutual information algorithms[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2010, 24(8): 2947 – 2960.

27 HOULIHAN D, BOUJARD T, JOBLING M. Feeding rhythms[M]. Oxford: Black Well Science Inc. , 2001.