

鱼体尾频运动模型研究

陈久军 肖刚 应晓芳 高飞 周鸿斌

(浙江工业大学计算机科学与技术学院, 杭州 310014)

摘要 鱼体运动特征能直观地反映水体环境质量状况,在生物水质监测中具有十分重要的意义。在分析鱼体运动模式的基础上,提出了基于鱼体骨架中心线的尾频活性模型,利用该模型获取鱼体尾频、速度、加速度等运动参数,表征鱼体游动在被监测水质中的运动活性程度。实验数据表明,模型较好地表征了鱼体当前的运动状态,为后期鱼体运动在生物水质监测中的应用提供了理论基础。

关键词 鱼体尾频 骨架中心线 运动活性 图像分析

中图法分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2009)10-2177-04

Fish Activity Model Based on Tail Swing Frequency

CHEN Jiu-jun, XIAO Gang, YING Xiao-fang, GAO Fei, ZHOU Hong-bin

(College of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014)

Abstract The fish motion essentially reflects the current state of water quality, so it is necessary to study the methods of obtaining the real-time dynamic motion characters of fish body in the field of biological water monitoring. Based on the analysis of fish locomotion model, the paper presents a fish activity model using the frequency of tail swing, which acquires some kinematical parameters, i. e., tail frequency, swimming velocity, acceleration and so on. The results show that the model, which can be used as the theoretical basis of the application, represents the fish motion activity accurately and efficiently in the biological water monitoring.

Keywords tail swing frequency, skeleton centerline, motion activity, image analysis

1 引言

在生物水质监测中,鱼类作为重要的指示生物,其运动特征、种群数量、生理特征等信息,直接反映了水体质量的变化情况,表示了当前环境污染状况。

作为水生生物,鱼类运动主要靠躯干、尾鳍及身体其他部分的协调配合来实现,表现为运动轨迹、速度、加速度、角速度等运动特征。Kim 研究了鱼体在不同状态下的运动特征,包括游动、转弯、急转弯^[1]。Sannomiya 利用系统理论建立了鱼群运动数学模型^[2]。尾鳍是鱼体运动的主要动力^[3-5],决定

了鱼体前进的方向。因此,单位时间内尾鳍的摆动频率(简称尾频)是鱼体活动特性的主要参数。尾频特性的研究关键在于鱼尾运动的有效描述与自动获取。

研究了基于骨架中心线的鱼体尾频运动模型。骨架中心线是鱼体形态中重要的几何特征,通过将平面区域抽取为图的形式加以表示^[6]。利用骨架中心线表示原始图像,可以在保持目标图像重要拓扑特征的前提下,减少图像中的冗余信息。

基于前期分割得到的鱼体轮廓图像,设计了一种简单快速的鱼体骨架中心线抽取方法。在此基础上,研究并实现了鱼体尾频运动活性模型。

基金项目:浙江省自然科学基金项目(Y1080636)

收稿日期:2009-06-22;**改回日期:**2009-07-17

第一作者简介:陈久军(1977~),男,讲师,2006年于浙江大学获计算机科学与技术专业博士学位。主要研究领域为图形图像、视觉监控、智能计算等。E-mail: rackycjj@zjut.edu.cn

2 鱼体尾频活性模型

基于图 1(a) 的鱼尾摆动模式,假设鱼体头部沿身体曲线 1/3 处点为鱼体质心点 C ,沿 C 点做曲线切线为 X 轴,以鱼体头部方向为 X 轴正方向;以 C 点为原点,做 Y 轴垂直于 X 轴。在 C 点处建立鱼的随体坐标,构建鱼尾随体模型,如图 1(b) 所示。

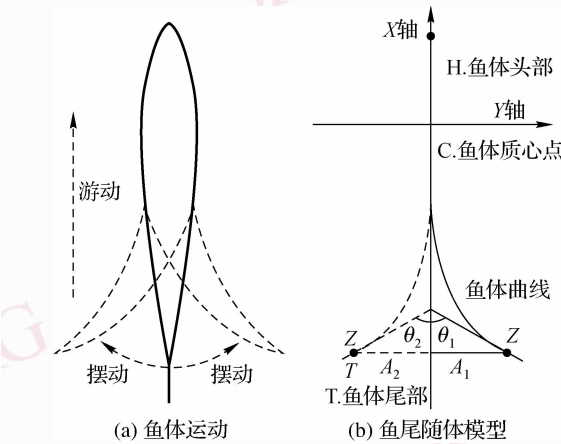


图 1 鱼尾运动模型
Fig. 1 Fish tail locomotion model

2.1 鱼体骨架中心线

基于鱼体对象轮廓线,利用边界点计算鱼体的质心点,由质心和边界点求取鱼体对象的长短轴;通过短轴扫描获取边界关键点,求出其中心点,构造出骨架中心线,表示鱼体对象。并进一步获取尾频、速度、加速度等鱼体活动特性。

(1) 计算鱼体质心

给定 2 维对象 $A, (x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, n$ 表示对象的所有边界点。由式(1)计算对象质心 $(\bar{x}, \bar{y})$,该点位于边缘矩形对角线交叉点上。

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (1)$$

(2) 确定鱼体主轴

如图 2 所示,定义 α 为长轴与水平轴间的夹角。如果所有边界点上的点到一条直线的垂直方向之和最小,则该直线方向为长短轴的方向;长短轴相互垂直,相交于质心,由此可以确定对象的长短轴。

$$x \tan \alpha - y + \bar{y} - \bar{x} \tan \alpha = 0 \quad (2)$$

边界点到直线的垂直距离为

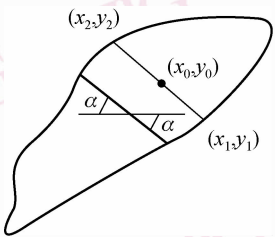


图 2 鱼体骨架中心线原理
Fig. 2 Principle of fish body skeleton centerline

$$p_i = (x_i - \bar{x}) \sin \alpha - (y_i - \bar{y}) \cos \alpha \quad (3)$$

所有边界点到直线距离总和为

$$p = \sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x}) \sin \alpha - (y_i - \bar{y}) \cos \alpha]^2 \quad (4)$$

则求导可知:

$$\tan 2\alpha = \frac{2 \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})^2 - (y_i - \bar{y})^2]} \quad (5)$$

计算得到主轴,且轴的变化与对象变化一致。

(3) 计算鱼体关键点

基于长短轴,计算对象边界点上的 4 个关键点,确定矩形相对于对象的方向。

判断所有边界点的位置:

$$f(a, b) \begin{cases} > 0 & (a, b) \text{ 在 } f(x, y) = 0 \text{ 上方或右侧} \\ = 0 & (a, b) \text{ 在 } f(x, y) = 0 \text{ 之上} \\ < 0 & (a, b) \text{ 在 } f(x, y) = 0 \text{ 下方或左侧} \end{cases} \quad (6)$$

由式(2)可得

$$(y - \bar{y}) - \tan \alpha (x - \bar{x}) = 0 \quad (7)$$

将 $x = x_i, y = y_i$ 代入到等式的左边,判断值 V ,如果 $V > 0$,则点 (x_i, y_i) 是长轴的上面边界点;如果 $V < 0$,则点 (x_i, y_i) 是下面边界点;如果 $V = 0$ 则点 (x_i, y_i) 为长轴上的点。通过计算分类所有边界点。

距离长轴最大的点,即为所要找的关键点。同理,利用式(8)求得短轴,可求出另外 2 个关键点。

$$(y - \bar{y}) + \cot \alpha (x - \bar{x}) = 0 \quad (8)$$

(4) 鱼体骨架中心线提取与拟合

基于图像的外接矩形,利用外接矩形一条短边,沿着矩形长轴方向对图像进行扫描,每次扫描将获取对象图像上的上下(左右)2 个边界点 (x_1, y_1) 和

(x_2, y_2) , 满足如下关系:

$$\frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2} = \tan \alpha (\tan \alpha)$$
$$x_0 = \frac{x_1 + x_2}{2}, y_0 = \frac{y_1 + y_2}{2}$$

(9)

则 (x_0, y_0) 即为图像沿着矩形长轴方向边界点的中点, 通过曲线拟合, 得到鱼体的中心线。

2.2 鱼尾随体坐标

基于拟合后的骨架曲线, 利用 $f = a_1 x^{a_2} + a_3$ 动态更新骨架中心线, 构造鱼随体坐标。

定义 x_0 处为身体曲线 1/3 处点 C 的横坐标, 则 C 点纵坐标为

$$f_0 = a_1 x_0^{a_2} + a_3$$

(10)

即 $C(f_0, x_0)$, C 点处曲线斜率为

$$f' = a_1 a_2 x_0^{a_2 - 1}$$

(11)

则 C 点处的切线方程为

$$f = a_1 a_2 x_0^{a_2 - 1} (x - x_0) + f_0$$

(12)

将式 (10) 代入式 (12) 得到 X 轴的方程为

$$f = a_1 a_2 x_0^{a_2 - 1} (x - x_0) + a_1 x_0^{a_2} + a_3$$

(13)

Y 轴方程为

$$f = \frac{-1}{a_1 a_2 x_0^{a_2 - 1}} (x - x_0) + a_1 x_0^{a_2} + a_3$$

(14)

式 (10), 式 (13) 和式 (14) 构成鱼体尾频随体坐标。

3 鱼体尾频测试

3.1 鱼尾随体坐标

图 3 表示了鱼体骨架中心线计算过程。方法利用对象轮廓边界点计算对象质心, 通过质心来获取

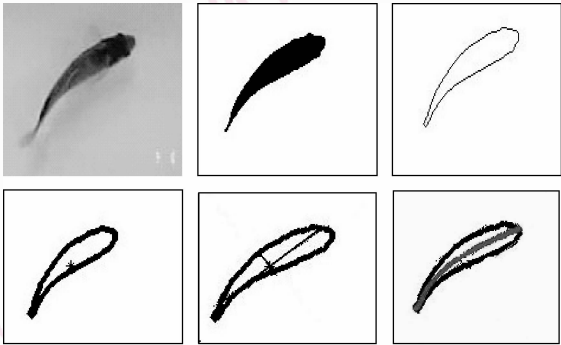


图 3 鱼体骨架中心线计算过程
Fig. 3 Process of fish body skeleton centerline

对象的方向长短轴, 最后利用长短轴扫描搜索边界点获取骨架中心线。因此, 算法计算量小, 速度快, 提取效果良好。

图 4 给出某个时间段内鱼体尾巴摆动 θ 角与幅度 A 的值 (其中, 鱼体运动距离采用一个像素点宽度作为单位距离)。

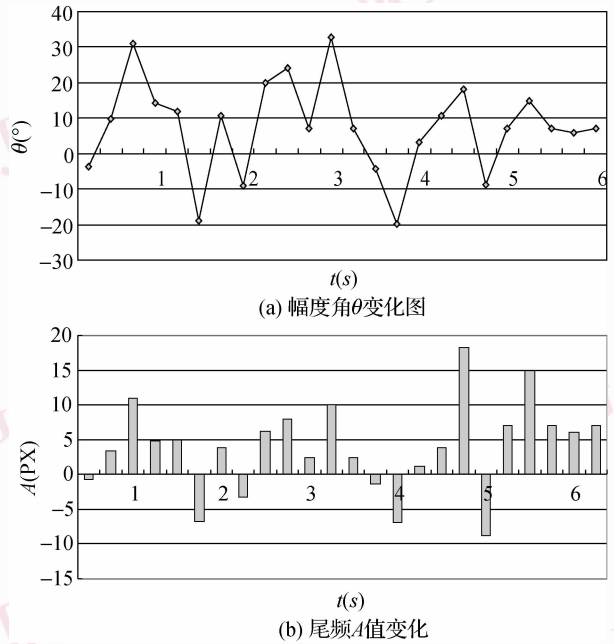


图 4 鱼体尾频运动参数
Fig. 4 Kinematical parameters of fish tail

定义 θ 值由 $\theta = 0$ 到下一个 $\theta = 0$ 的过程为鱼体的一次完整摆尾运动, 用 n 统计单位时间 T 内完整摆尾次数, 得到尾频值 $p = n/T$ 。

表 1 给出了某一小时内鱼体活动尾频值、最大幅度角和幅值数据。根据相关数据, 尾频较为直观地描述了鱼体某一时间段内的运动活跃程度。

表 1 尾频活性表征

Tab. 1 Motion activity of fish tail

时间 (min)	尾频 (Hz)	最大摆动角度 ($^{\circ}$)		最大摆幅	
		正向	负向	正向	负向
0 ~ 20	0.16	33.5	-30.7	14.7	-13.4
20 ~ 40	0.43	45.7	-38.9	19.8	-16.8
40 ~ 60	0.22	30.8	-31.3	13.2	-13.9

3.2 尾频活性与运动速度

以鱼体运动模型中的质心点 C 为参考点, 进行速度计算。假定在两帧相邻图像的时间间隔 $dt = |t_2 - t_1|$ 内, 鱼体做匀速直线运动, 通过计算该间隔

内质心点 C 的移动距离来计算鱼体速度。

设 S 表示鱼体两帧之间移动距离,则

$$S = \sqrt{(y_1 - y_2)^2 + (x_1 - x_2)^2} \tag{15}$$

式中, x_1, x_2, y_1, y_2 分别表示鱼体质心点 C 在前一帧和后一帧的坐标点位置,则速度

$$v = S/dt = \frac{\sqrt{(y_1 - y_2)^2 + (x_1 - x_2)^2}}{dt} \tag{16}$$

图 5 给出了 50 s 内任意时刻鱼体速度。目标运动速度反映了目标运动的快慢,表征了鱼体游动在被监测水体中的活性程度。通过数据分析,鱼体一般速度维持在 50 PX/s;同时,鱼体瞬间尾频摆动使鱼体获得较大的运动速度。

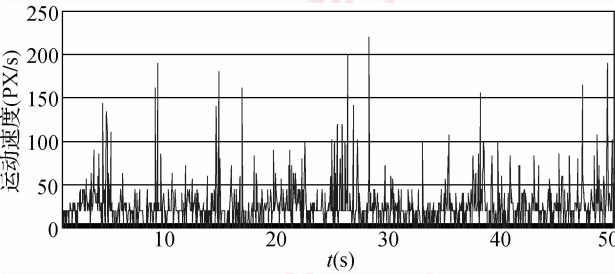


图 5 50 s 内鱼体运动速度统计

Fig. 5 Fish velocity curve in 50 s

4 结 论

在分析鱼体运动模式的基础上,提出了鱼体骨架中心线提取方法。在此基础上,设计了鱼体尾频

运动模型,利用该模型直接获取鱼体尾频、运动速度等鱼体运动特性参数,表征鱼体运动的活性程度。通过实验分析,所获取的运动参数,较好地表征了鱼体当前的运动活性,为后期将鱼体运动用于水质监测提供了理论依据。

参考文献 (References)

- 1 Kim C M, Shin M W, Jeong S M, *et al.* Real-time motion generating method for artificial fish [J]. International Journal of Computer Science and Network Security, 2007, 7(10): 52-61.
- 2 Sannomiya N, Nakamine H, Matuda K. Application of system theory to modeling of fish behavior [A]. In: Proceedings of the 29th Conference on Decision and Control [C], Honolulu, Hawaii, USA, 1990: 2794-2799.
- 3 Chen Hong, Zhu Chang-an, Yi Xie-zhen, *et al.* Kinematic characters on c-turn swimming of fish-like robot [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2008, 25(2): 229-234. [陈宏, 竺长安, 尹协振等. 鱼形机器人快速转向的运动特性研究 [J]. 应用力学学报, 2008, 25(2): 229-234.]
- 4 Franklin C E, Wilson R S, Davison W. Locomotion at 1.01C: burst swimming performance of five species of antarctic fish [J]. Journal of Thermal Biology, 2003, 28(1): 59-65.
- 5 Jing Jun, Li Sheng, Lu Xi-yun, *et al.* The kinematic analysis of c-start in crucian carp [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2004, 19(3): 276-282. [敬军, 李晟, 陆夕云等. 鲫鱼 C 形起动的运动学特征分析 [J]. 实验力学, 2004, 19(3): 276-282.]
- 6 Castleman K R. Digital Image Processing (2nd edition) [M]. Translated by Zhu Zhi-gang, Beijing: Electronics Press, 2002. [Castleman K R 著. 数字图像处理 (第二版) [M]. 朱志刚译. 北京: 电子工业出版社, 2002.]