

文章编号: 1001-4888(2005)04-0525-07

基于序列图像的鱼游运动机理分析*

郭春钊, 汪增福

(中国科学技术大学 自动化系, 安徽合肥 230027)

摘要: 自上世纪 60 年代起, 鱼游运动机理分析一直是研究的热点之一。本文提出了一种基于序列图像的鱼游运动机理分析方法, 从图像处理的角度来分析鱼游运动机理问题。该方法首先通过图像差分得到鱼体的轮廓, 然后利用能量函数自动抽取游动鱼体的体干曲线。在此基础上, 通过样条曲线参数拟合进一步得到鱼体游动时体干曲线形变的准确数据和各种运动学参数。以黑鳍鲨稳态游动为例, 本文还建立了鲛科模式游动的运动学参数模型并讨论了模型中参数对鱼体游动的影响。实验表明, 相比于传统方法, 本文所提出的方法无需对实验环境和对象加以限制, 可以自动获得鱼类游动时的体干曲线形变的准确数据, 从而据此建立更加真实有效的鱼游运动学参数模型。

关键词: 鱼游运动; 机理分析; 图像处理; 仿生学

中图分类号: Q66 **文献标识码:** A

1 引言

作为世界上最早出现的脊椎动物, 鱼类无疑是水中运动的王者。相比于常规螺旋桨航行器的推进效率低, 结构尺寸和重量大, 对环境扰动大, 噪声大, 可靠性差, 启动、加速性能差以及运动灵活性能差等缺点而言, 鱼类游动近乎完美。依靠鱼体和鳍的协调摆动, 鱼类既可以在持久游速下保持低能耗、高效率, 又可以在拉力游速和爆发游速下实现高机动性^[1]。因此, 分析鱼游运动机理, 并建立准确的运动模型是一项十分有意义的工作, 它可能会给未来的航行推进带来技术性的变革, 实现高效、快速、机动灵活的水下航行器。

事实上, 自上世纪 60 年代起, 鱼游运动机理分析就已经成为力学领域研究的热点之一, 许多力学家投身其中, 通过实验测量鱼体游动, 分析机理进而得到鱼游运动模型。其中, 很多研究者采用在鱼游动的水槽底部标明刻度, 观察或拍摄鱼体运动, 手工获取鱼游数据的方法^[2~5], 该方法的精度相对较差; 还有一些研究者开发了复杂严密的装置来提高测量的精度^[6,7], 但是造价昂贵, 可移植性差。更重要的是, 上述实验方法都需要把鱼放到一个空间十分有限的水槽中, 而水槽本身又会反过来影响鱼的游动, 使其测量的鱼体游动并非真实的自由游动。另外, 上述方法对于实验的环境和对象具有局限性, 对大型鱼类或高雷诺数游动机理的研究则无能为力。

本文从图像处理的角度出发, 提出了一种基于序列图像的鱼游运动机理分析的方法。首先, 对输入连续两帧图像进行直方图均衡化和差分运算, 得到图像中的鱼体运动区域, 依据运动区域的灰度信息, 快速有效地从原图像中提取出鱼体的轮廓。接着, 利用能量函数从轮廓图像中自动抽取其体干曲线。最后, 利用 Matlab 工具箱对鱼游体干曲线进行样条曲线参数拟合分析, 从而获得鱼游时体干曲线形变的准确数据和各种运动学参数。鱼体正是通过改变其体干曲线, 从而直接控制周围的水流而产生

* 收稿日期: 2005-01-16; 修订日期: 2005-07-04

通讯作者: 汪增福(1960-), 男, 工学博士, 博士生导师。主要研究方向: 视觉信息处理, 智能机器人, 模式识别。

推力的。

依据此方法,本文通过实验测量黑鳍鲨的稳态游动,建立了鱼类鲹科模式游动的运动学参数模型并讨论了模型中参数对鱼体游动的影响。实验结果表明,该方法是一种行之有效的方法。它无需对实验环境和对象附加限制条件,使测量的鱼体自由游动更加真实,即使是对大型鱼类或高雷诺数游动也可以很好的解决。另外,该方法对噪声也具有较好的抑制作用,在复杂背景下依然能够自动地确定目标鱼体准确的体干曲线,得到相比于手工方法更准确的鱼游数据,从而据此建立的模型也更加真实有效。

2 鱼体轮廓提取

如前所述,欲得到鱼游体干曲线,首先要提取出鱼体的轮廓。在水中,鱼体保持运动状态,利用其运动信息,可以简单有效地把鱼体运动部分从复杂背景中提取出来。然后,利用运动部分的位置和灰度信息,获得鱼体的二值图像。

鱼类的进化使其外表与生存环境极为相似,致使拍摄出来的鱼游图片灰度分布较为集中。为了有效地利用被允许的灰度级范围,首先对源图像进行直方图均衡化,以改善图像质量,提高鱼体与背景的对比度。

图像差分是把运动物体从复杂背景下分离出来的一种快速有效的途径。考虑一个图像序列:在图像中要检测的鱼体处于运动状态,而背景大致保持不变。那么,通过对相邻两帧图像进行差分运算,可以舍弃图像中保持不变的部分(如大部分背景),而保留发生变化的运动区域。

本算法首先对相邻的两帧经过直方图均衡化的图像进行差分运算,从而快速有效地得到其中的运动区域。显然,鱼体的整个轮廓都包含在图像的运动区域中。

设 $g_i(x, y)$ 和 $g_{i-1}(x, y)$ 分别是当前图像及其相邻的上一帧图像中对应像素的灰度值。其差值为

$$m = |g_i(x, y) - g_{i-1}(x, y)| \quad (1)$$

显然,图像中基本保持不变的区域的 m 值较小,而运动区域的 m 值较大,这样在其灰度直方图中就表现为一低一高的两个波峰,如图 1 所示。

两峰之间的波谷 k 是最适宜的阈值。将 m 值同 k 进行比较,当 $m > k$ 时,则认为该像素点属于变化的区域,予以保留;反之,当 $m \leq k$ 时,则认为该像素点属于未变化的区域,将其舍弃。这样,可以将鱼体所在的运动区域从复杂背景中分离出来。

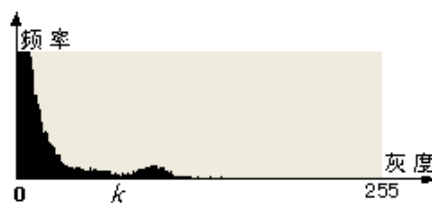


图 1 阈值的选取

Fig. 1 Threshold choosing

在此基础上,进一步对分离出来的运动部分的灰度分布进行统计分析以提取鱼体轮廓。

具体过程如下:

1. 对相邻两帧图像进行差分运算,抽取其运动部分;
2. 统计运动部分的灰度信息,得出其灰度值范围 $[m_l, n_l], \dots, [m_i, n_i], \dots, [m_k, n_k]$;
3. 保留源图像中 $g_i(x, y) \in [m_i, n_i]$ 的部分 ($l \leq i \leq k$), 其中 $g_i(x, y)$ 为对应像素点的灰度值;
4. 对第 3 步的结果(保留的各区域)的面积(像素点的数目)进行统计,若其面积小于某个阈值 S , 则认为是噪声, 将该区域作为背景处理; 而面积大于阈值的区域保留;
5. 一幅图像中的鱼体应该是一个连通的区域。如果第 4 步的结果为一个连通的区域, 将其作为提取鱼体轮廓的结果; 否则, 如果提取的区域不连通, 扩大第 3 步中的灰度范围 $[m_i, n_i]$ ($l \leq i \leq k$), 转到 3。
6. 提取出鱼体后, 对该图像按下式做二值化处理,

$$I(x, y) = \begin{cases} 0 & (x, y) \in \text{鱼体区域} \\ 255 & (x, y) \notin \text{鱼体区域} \end{cases}$$

得到鱼体的二值图像。

鱼游图片的背景一般多为海水和海底,恰当的尺度域值 S 和连通性检验可以保证不会把背景当作鱼体而保留下来。对于彩色图像,算法原理不变,进行比较的信息由灰度变成对应像素点的 RGB 值。

3 鱼游体干曲线抽取

鱼类游动主要靠躯干、尾鳍和胸鳍的协调配合,准确地抽取出各时刻对应于鱼体躯干、尾鳍和胸鳍的体干曲线是分析鱼游运动机理的关键。利用能量函数法可以从轮廓图像中抽取对应的体干曲线。

设鱼体的二值图像 $I(x, y)$ 为

$$I(x, y) = \begin{cases} 0 & (x, y) \in \text{鱼体区域} \\ 255 & (x, y) \notin \text{鱼体区域} \end{cases}$$

1. 定义能量函数^[8]

$$\epsilon(x, y, r) = \iint_D (r - \sqrt{u^2 + v^2}) I(x + u, y + v) dudv - \frac{r^\alpha}{\alpha} \quad (2)$$

式中,积分区域 D 为一个位于鱼体内部的、圆心 $O(x, y)$ 和半径 r 均可改变的圆形区域。第一项的目的是使所设定的圆形区域保持在鱼体的内部,第二项的目的是使该圆的半径 r 达到极大值,其中, α 为一个常量,用来调整所述圆形积分区域的半径 r 对能量函数的影响,一般取 2 或 3。当 x, y 和 r 的取值使能量函数 $\epsilon(x, y, r)$ 达到最小时,上述积分圆形区域 D 的圆心 $P(x, y)$ 即位于轮廓中轴线上,半径 r 的取值则使圆的外缘和鱼体轮廓线相切。

2. 按从上向下的顺序对鱼体二值图像逐行进行搜索,寻找到图像中的最上部的区域,然后利用 1 中给出的方法确定一个点 $P(x, y)$,作为搜索的起始点。

3. 以上述 $P(x, y)$ 为种子点,按如下的方法逐步确定鱼体体干曲线上的所有点:

① 设已确定了体干曲线上的一个点 $P_n(x_n, y_n)$,现在在此基础上搜索 P_{n+1} 。如图 2 所示,以 P_n 为中心向四周作 m 条射线,统计各射线段的长度 d_i 以及它们与水平方向的夹角 $\theta_i (i=0, 1, \dots, m-1)$ 。如果 d_i 仅在 θ_{\max} 处有极大值,就把 θ_{\max} 作为搜索方向,在 P_n 的基础上搜索 P_{n+1} ;如果 d_i 有多个极大值,就沿使 d_i 取这些极大值的方向分别进行搜索,如图 3 所示。

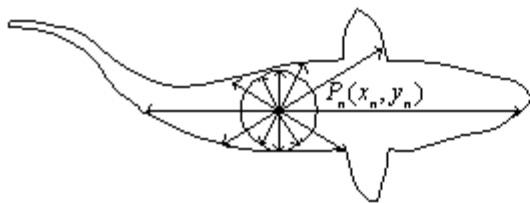


图 2 搜索方向的确定

Fig.2 Determination of the search direction

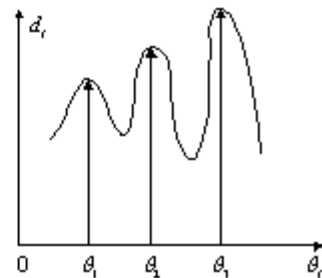


图 3 多个搜索方向

Fig.3 Multi-directions for search

② 将 $\hat{P}_{n+1}(x_{n+1}, y_{n+1}) = (x_n + \Delta \cos \theta_n, y_n + \Delta \sin \theta_n)$ 作为 P_{n+1} 的候选 (Δ 为搜索步长)。如果 \hat{P}_{n+1} 位于轮廓内,则以 \hat{P}_{n+1} 为圆心,作一圆形区域,将区域内的点的坐标值代入能量函数 $\epsilon(x_{n+1}, y_{n+1}, r_{n+1})$ 中,在 x_{n+1}, y_{n+1} 和 r_{n+1} 的可能取值范围内,寻找一点使得能量函数 $\epsilon(x_{n+1}, y_{n+1}, r_{n+1})$ 达到极小,并将其作为所求的体干曲线点 $P_{n+1}(x_{n+1}, y_{n+1})$ 。然后回到步骤①,寻找下一个体干曲线点;反之,如果 \hat{P}_{n+1} 处于轮廓外,则对应于该曲线分支的搜索过程结束。

最后,将按上述方法搜索得到的所有体干点按搜索顺序一一连接起来,即得到相应的鱼体体干曲线。

4 实验分析与模型建立

4.1 黑鳍鲨稳态游动序列图像分析

图 4 所示为在上海海洋水族馆用 Canon A75 数码相机拍摄得到的黑鳍鲨稳态游动一个周期的序列图像。对该序列图像按前述方法处理,得到体干曲线如图 5 所示。

由体干曲线的形变可知,稳态游动下鲭科模式的推进运动主要由两部分组成,即鱼体的波动和尾鳍的摆动(平动复合运动)。鱼体波为一由头至尾传播,且波幅渐增的行波,波幅最大处被严格限制在鱼体

后 1/3 处的尾部。尾鳍做平动与摆动的复合运动,且二者存在一定的相位差。两侧胸鳍连线与躯干中心线的交点处摆幅接近为零。

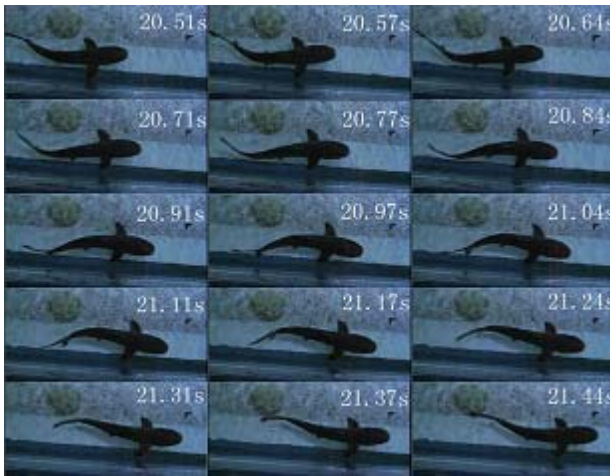


图4 黑鳍鲨稳态游动序列图像

Fig. 4 Image sequences of shark swimming

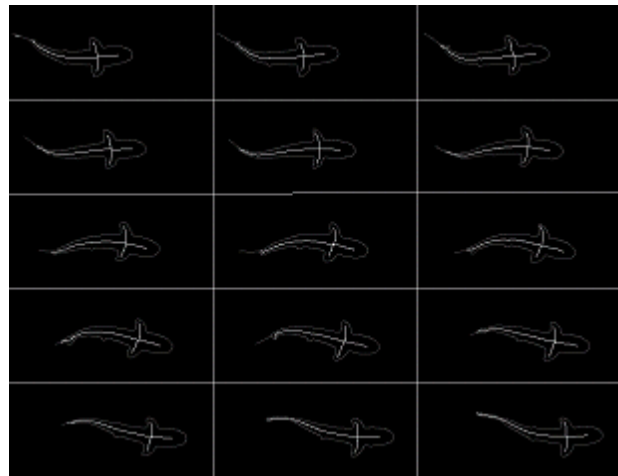


图5 黑鳍鲨稳态游动物体干曲线

Fig. 5 Body curve of the swimming shark

以上述交点为重合点,将鱼游运动各时刻的体干曲线(不包括尾鳍)集中于一幅图像,如图6所示,可以得到鱼体行波波幅的包络线。

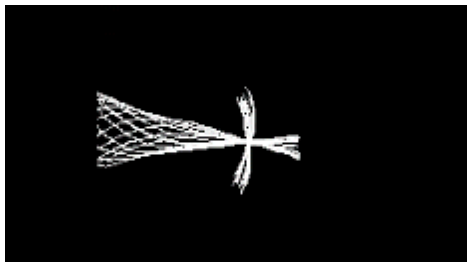


图6 体干曲线集合

Fig. 6 Body curve centralization

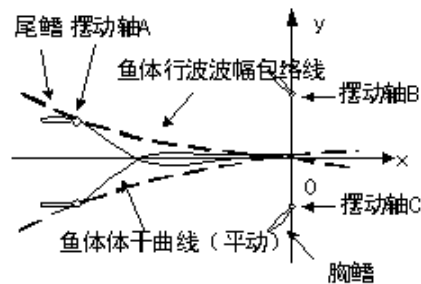


图7 鱼体简化物理模型

Fig. 7 Simplified physical model of fish

4.2 鱼体简化物理模型

基于图5所示的鱼体体干曲线的柔软性,鱼体的物理模型简化为如图7所示。该模型中,鱼体简化为无限柔软的二维样条曲线,尾鳍和左右胸鳍简化为分别绕摆动轴 A、B、C 复合摆动的刚性平板。

4.3 鲨鱼胸鳍的作用

鲨鱼游动时,其胸鳍以一定的击水角度僵硬地直立于鱼体两侧,故它不能对鱼体的游动贡献向前的推进力,只是通过正的击水角度提供一个升力,并维持鱼体的平衡。另外,鱼体还可以通过调整胸鳍的击水角度使鱼体俯仰,从而完成下潜上浮的运动。

4.4 鲛科模式运动学参数模型

考虑如图7所示坐标系,两侧胸鳍连线与躯干中心线的交点作为鱼体样条曲线的原点,鱼游动方向为 x 轴的正方向,原点 O 至尾鳍摆动轴 A 的距离 L 为单位长度。

鱼体从静止开始起动,波幅从零逐渐增大至恒定值,进入稳态游动状态。如前所述,鱼体波动为一波幅渐增的行波,由 Lighthill^[11]的细长体理论,其运动方程可描述为

$$y(x, t) = A(x, t) \sin[kx + \omega(t - t_0)] \tag{3}$$

其中 $y(x, t)$ 为鱼体侧向位移, $A(x, t)$ 为鱼体波波幅, $k = 2\pi/\lambda$ 为鱼体波波数, $\omega = 2\pi/T$ 为鱼体波频率, t_0 为起动时间。 t_0 时刻内,鱼游处于起动状态,其波幅逐渐增大; t_0 时刻后,鱼体达到稳态游动。考虑到 x 和 t 是独立的,故鱼体波波幅应包含两项 $A(x, t) = a_1(x) a_2(t)$, 其中 $a_1(x)$ 为稳态游动时鱼体波幅包

络线; $a_2(t)$ 为起动项, 用来描述起动过程中波幅的变化。鱼体的起动过程丰富多样, 即使对同一种鱼, 它的每次起动也不尽相同, 故 $a_2(t)$ 并没有统一的形式, 但当 $t > t_0$ 后, $a_2(t)$ 的值恒为 1。

对图 6 所示的稳态游动波幅包络线利用 Matlab 进行曲线拟合分析可以得到常数项为零的二阶多项式最为符合

$$a_1(x) = (c_1 x^2 + c_2 x) \tag{4}$$

其中, $c_1 = 0.06396$, $c_2 = -0.1353$ 。如图 8 所示。

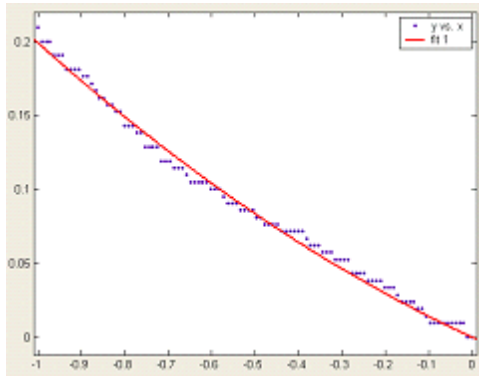


图 8 鱼体波幅包络线拟合结果

Fig. 8 Spline fit curve of amplitude envelope

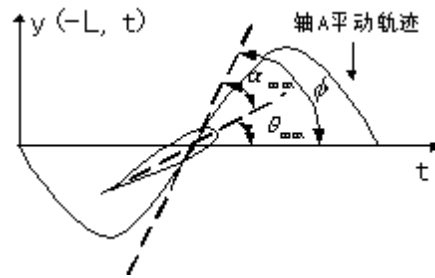


图 9 尾鳍摆动最大幅度和最大击水角度

Fig. 9 Definition of amplitude of caudal fin oscillation

另外一个对鱼体推进具有重要意义的是尾鳍的平动复合运动。绕轴 A 作摆动运动的尾鳍, 与摆动轴 A 的平动存在相差 ϕ (摆动领先平动)。轴 A 位于 $-L$ 处, 其平动方程为

$$y_A(-L, t) = A(-L, t) \sin[k(-L) + \omega(t - t_0)] \tag{5}$$

而尾鳍的摆动方程可描述为

$$\theta(t) = \theta_{\max} \sin[k(-L) + \omega(t - t_0) + \phi] \tag{6}$$

其中, θ_{\max} 为最大摆幅, 且满足

$$\theta_{\max} = \phi - \alpha_{\max} \tag{7}$$

这里, ϕ 为 $y_A = 0$ 时 y_A 的斜率; α_{\max} 为最大击水角度, 如图 9 所示。

对第 4 幅鱼游图像 (20.71s 时刻) 按上述方法分析可得: $\phi = 66^\circ$, $\alpha_{\max} = 24^\circ$, $\theta_{\max} = 42^\circ$ 。

分析序列图像可知鱼体波周期 $T = 0.93s$, 摆动平动相差 $\phi = 77^\circ$, 以图中岩石为参照物可知鱼体游动速度 $U = 1.11L/s$ 。对于鱼体后 $1/3$ 上任意一点, 其方程为

$$y = (c_1 x^2 + c_2 x) \sin[2\pi x/\lambda + 2\pi(t - t_0)/T] \tag{8}$$

为得到鱼体波波长 λ , 令

$$\varphi = 2\pi x/\lambda - 2\pi t_0/T \tag{9}$$

并利用鱼体上平动较显著的 5 个点 $x = -104, -95, -90, -85, -80$ 的运动过程对式 (10) 中的 φ 分别进行参数拟合。

$$y = (c_1 x^2 + c_2 x) \sin(2\pi t/T + \varphi) \tag{10}$$

式 (9) 中只有两个未知数 λ 和 t_0 而式 (10) 共得到了 5 个方程, 这是一个超定方程组, 可以得到其最小二乘解 $\lambda = 1.3387L$, 即鱼体波长 $\lambda = 1.3387L$, 如图 10 所示。

而鱼游效率近似为^[9],

$$\eta = 1 - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{U}{V}\right) = 88.6\% \tag{11}$$

其中 $V = \lambda/T = 1.44L/s$ 为鱼体波速, $U/V = 0.77$ 。

为了验证以上所建立的运动学参数模型, 本文对该模型进行了 Matlab 运动仿真。仿真的条件采用由本文所述方法对图 4 所示的序列图像处理得到的鱼游数据: 周期 $T = 0.93s$; 鱼游速度 $U = 1.11L/s$; 鱼体波波幅包络线系数 $c_1 = 0.06396$, $c_2 = -0.1353$; 鱼体波波长 $\lambda = 1.3387L$; 尾鳍最大摆幅 $\theta_{\max} = 42^\circ$;

尾鳍摆动与平动相差 $\psi=77^\circ$ 。

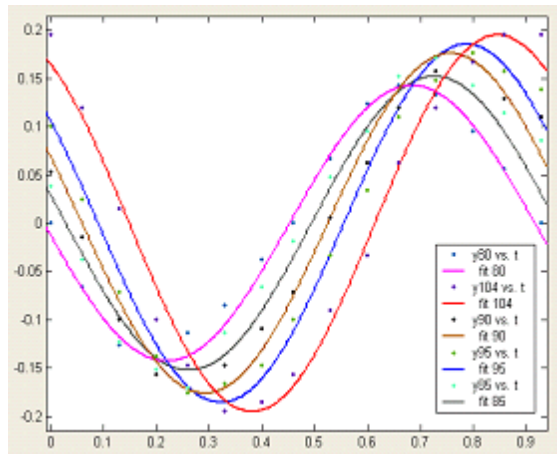


图 10 鱼体平动运动拟合结果

Fig. 10 Spline fit curve of fish body undulation

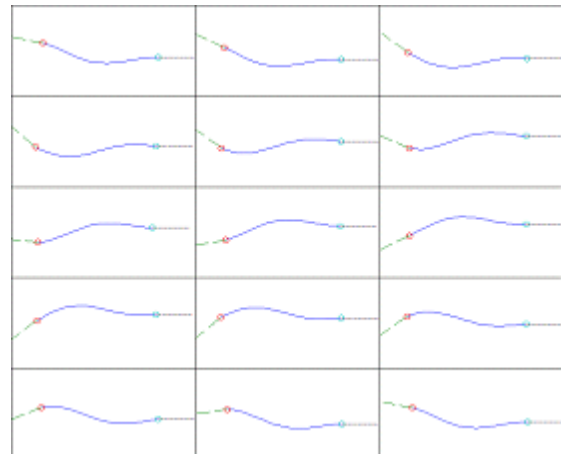


图 11 运动学模型仿真结果

Fig. 11 Simulation result of the model

根据式(3)和式(6)及仿真条件,鱼体中心线的运动轨迹如图 11 所示。可以看到,根据模型得到的鱼体游动仿真结果与实际鱼体游动时的体干曲线形变相互吻合,故所建立的运动学模型能够真实有效的描述鳝科模式鱼类稳态游动情况下的鱼体运动,根据本文提出的方法对鱼游运动测量得到的各种参数也非常准确。

4.5 讨论

通过对拍动翼模型的推进性能研究发现,影响其推进性能的主要参数主要有以下五个^[12,13]:鱼体平动幅值与尾鳍翼弦长度之比、最大击水角度 α_{\max} 、摆动平动相差 ψ 、斯德鲁哈尔数 St 以及尾鳍摆动轴的位置。其中尾鳍摆动轴的位置一般由模仿的鱼种类而定; α_{\max} 和 St 跟推进力和尾迹的动力学性能有着直接的联系;而 ψ 则决定了涡流形成和脱落的时机。为了获得最佳的推进效果,上述参数应该满足^[1,9]:

- 1) 斯德鲁哈尔数正好对应于拍动翼尾迹出现反向卡门涡街,大致为 $0.25 < St < 0.40$ 范围内;
- 2) 平动幅值接近于尾鳍翼弦长度;
- 3) 最大击水角度处于 $15^\circ < \alpha_{\max} < 25^\circ$ 范围内;
- 4) 对于摆动轴 A 位于尾鳍 2/3 处情况下,摆动运动领先平动运动大约 77° 。

而根据本文所述方法实验测得的上述参数为: $St=0.36$;平动幅值/翼弦长度=0.68; $\alpha_{\max}=24^\circ$; $\psi=77^\circ$ 。 St 和 α_{\max} 处于最佳范围内,而平动幅值/翼弦长度值偏低, ψ 值偏高。这可能是由于鲨鱼尾鳍与实验用的拍动翼在形状、材质、硬度等方面的差异造成的。

5 结论

仿生机器鱼是近年来机器人研究的热点之一,凭借其高效率、高机动性和低噪音等优点,已广泛应用于管道检测、海洋生物观察、海底勘探、军事和娱乐等方面。分析鱼游运动机理,并建立准确的运动学参数模型是仿生机器鱼研究的第一步。

本文提出了一种基于序列图像的鱼游运动机理分析方法,从图像处理的角度完成实验测量鱼游运动的研究。该方法首先提取出鱼体的轮廓,然后利用能量函数抽取出鱼体体干曲线,再用样条曲线进行参数拟合,从而得到鱼游动时体干曲线变化的准确数据和各种运动学参数。此外,本文还通过实验测量黑鳍鲨的稳态游动,建立了鱼类鳝科模式的运动学参数模型,并讨论了模型中参数对鱼体游动的影响。实验结果表明,该方法无需对研究环境和对象附加限制条件,使测量的鱼体自由游动更加真实,即使对大型鱼类或高雷诺数游动也能很好的解决。而且自动获得的鱼游体干曲线形变的数据相比于手工方法更为准确,从而据此建立的模型也更加真实有效。

下一步工作将对鱼游运动的起动、转弯及制动等机动动作进行体干曲线的分析和建模。基于各种运动状态下的体干曲线设计出的仿生机器鱼,无论从机械结构的角度,还是从运动控制和水动力学性能的角度,都能够更加真实地模拟实际鱼体的游动,甚至达到以假乱真的程度。

参考文献:

- [1] 童秉纲. 鱼类波状游动的推进机理[J]. 力学与实践, 2000, 22(3): 69~74 (Tong Bing-gang. Propulsive Mechanism of Fish's Undulatory Motion. *Mechanics in Engineering*, 2000, 22(3): 69~74(in Chinese))
- [2] 敬军, 李晟, 陆夕云, 尹协振. 鲫鱼 C 形起动的运动学特征分析[J]. 实验力学, 2004, 19(3): 276~282 (Jing Jun, Li Sheng, Lu Xi-yun, Yin Xie-zhen. The Kinematic Analysis of C-start in Crucian Carp (*Carassius Auratus*). *Journal of Experimental Mechanics*, 2004, 19(3): 276~282(in Chinese))
- [3] 梁建宏, 王田苗, 魏洪兴. 仿生机器鱼的研究进展 I—鱼类推进机理[J]. 机器人, 2002, 24(2): 107~111 (Liang Jian-hong, Wang Tian-miao, Wei Hong-xing. Research and Development of Underwater Robofish I-Development of a Small Experimental Robofish. *ROBOT*, 2002, 24(2): 107~111(in Chinese))
- [4] Videler J J. Fish Swimming[M]. London, U. K. Chapman & Hall, 1993
- [5] Mason R, Burdick J W. Experiments in Carangiform Robotic Fish Locomotion[A]. IEEE International Conference on Robotics & Automation[C]. San Francisco, CA. 2000: 428- 435
- [6] Zeng L J, Matsumoto H, Kawachi K. Simultaneous measurement of the position and shape of a swimming fish by combining a fringe pattern projection method with a laser scanning technique[J]. *Optical Eng.*, 1998, 37: 1500~1504
- [7] Wang H, Zeng L J, Yin C. A video tracking system for measuring the position and body deformation of a swimming fish[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2002, 73: 4381~4384
- [8] Zhu S C, Yuille A L. FORMS: a Flexible Object Recognition and Modeling System [A], Proc. IEEE ICIP94[C], Austin, Texas. 1994: 465~472
- [9] Sfakiotakis M, Lane D M, Davies J B C. Review of Fish Swimming Modes for Aquatic Locomotion[J]. *IEEE Journal of Ocean Engineering*, 1999, 24(2): 237~252
- [10] Webb P W. Form and function in fish swimming[J]. *Scientific American*, 1984, 251(1): 58~68
- [11] Lighthill M J. Note on the swimming of slender fish[J]. *Journal of Fluid Mech.* 1960, 9: 305~317
- [12] Triantafyllou M S, Triantafyllou G S, YUE D K P. Hydrodynamics of fishlike swimming[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2000, 32(1): 33~53
- [13] Anderson J M, Streitlien K, Barrett D S, Triantafyllou M S. Oscillating foils of high propulsive efficiency [J]. *Journal of Fluid Mech.*, 1998, 360: 41~72

An Analysis of Fish Swimming Locomotion Mechanism Based on Image Sequences

GUO Chun-zhao, WANG Zeng-fu

(Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei Anhui 230027, China)

Abstract: Fish swimming locomotion mechanism is one of the hotspots in the field of mechanics since 1960s. In this paper we presented an analytical method for fish locomotion mechanism based on image sequences from the point of view of image processing. An energy function was employed to obtain the skeleton of a fish body. By using a spline based curve fitting technique to fit the data above, we could find out the locomotion mechanism of fish and establish an accurate and practical mathematical model of fish kinematics. The experimental results show that the method can obtain more precise data without any additional restricts such as environment or object compared with traditional method, and the mathematical model is more accurate and practical.

Key words: fish swimming; locomotion mechanism; image processing; biomimetics