

文章编号 1004-924X(2009)09-2165-05

鲤鱼尾鳍瞬时三维形态测量

蒋 明^{1,2}, 张 曙³, 何小元¹

(1. 东南大学 土木学院, 江苏 南京 210096; 2. 苏州科技学院 土木学院, 江苏 苏州 215011;
3. 中国科学技术大学 苏州研究院, 江苏 苏州 215123)

摘要:鱼类游动时尾鳍的重要作用是产生推力。为了正确理解尾鳍的运动结构和运动特性,提出了基于傅里叶变换轮廓术的尾鳍实时三维形态测量方法。以巡游状态下的鲤鱼为实验对象,将影栅云纹投射在尾鳍表面,产生包含三维动态信息的云纹;由高速摄像机实时采集序列变形条纹,经过傅里叶变换、频谱滤波、逆傅里叶变换和基于时间序列的三维相位展开等处理后,重建了尾鳍的序列瞬时三维形态模型,真实再现了尾鳍复杂的三维运动过程。由摆幅-时间曲线获得尾鳍的摆动频率为 1.42 Hz,实验表明提出的测量方法不仅可用于研究尾鳍的动态瞬时特性,还可用于定量分析其连续变化过程。

关键词:三维形态测量;影栅云纹;傅里叶变换;尾鳍;瞬时三维形态

中图分类号:O438 **文献标识码:**A

Instantaneous three-dimensional profile measurement of tail fin of carp

JIANG Ming^{1,2}, ZHANG Shu³, HE Xiao-yuan¹

(1. *College of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;*
2. *College of Civil Engineering, University of Science and Technology of Suzhou,*
Suzhou 215011, China; 3. *Suzhou Institute for Advanced Study, University of*
Science and Tcehnology of China, Suzhou 215123, China)

Abstract: The important role of tail fin of a fish in swimming is to produce a thrust. In this paper, a three-dimensional test and analysis method for instantaneous 3D tail fin profile measurements based on the Fourier transform profilometry was proposed to understand the function of the tail fin. By taking a carp in cruising for an example, the moiré fringes were projected onto a carp tail fin to produce the deformed fringe patterns containing 3D information. Then, a high-speed camera was used to capture these time-sequence images. After Fourier transform, filtering, inverse Fourier transform and unwrap for these phase maps in a 3D phase space, a instantaneous 3D profile model was established and the complex tail fin movements were really reconstructed. Through the analysis of displacement-time curve, the tail-beat frequency is calculated to be 1.42 Hz. It is concluded that the presented study provides a new method both in study of the kinetic characteristic and in quantified analysis of change processing for the tail fin during steady swimming.

收稿日期:2008-08-26;修订日期:2008-10-16.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 10872139)

Key words: three-dimensional profile measurement; shadow moiré; Fourier transform; tail fin; instantaneous 3D profile

1 引言

鱼类经过上亿年的演变,在漫长的自然选择进化过程中形成了各具特色的运动能力和与之相适应的身体形态。研究表明^[1-3]鱼类身体外形和鱼鳍形态特征的不同将对鱼的巡游能力、精确机动能力和加速能力 3 个方面产生影响。鱼鳍的摆动频率、摆动速度与鱼游动速度间关系作为鱼类仿生学研究的一个重要课题已得到广泛的关注。Ferry 和 Lauder^[4]在鲨鱼尾鳍上做了 8 个标记点,通过同步拍摄鲨鱼游动时的侧视图和后视图,分析鲨鱼游动时尾鳍上标记点的空间分布,获取了鲨鱼尾鳍的三维运动参数。Wilga^[5]同时拍摄了侧视、俯视和后视图,并在每个胸鳍上设了 4 个标记点,重构了胸鳍的三维运动形态,描述了上浮、维持和下潜 3 种游动状况下胸鳍的摆动角度。现有的研究方法主要是采用这种多视角拍摄图像,通过设立标志点方法来分析鱼鳍的三维运动过程,因为不能反映鱼鳍的完整三维形态,这种研究方法只能描述大致的运动过程,难以精确分析鱼鳍与周围流场间的关系,也很难实现图像同步和匹配过程。

傅里叶变换轮廓术^[6]是三维传感领域中运用较为广泛的一种测量方法,它只需采样一帧变形条纹即可获得被测物的空间三维形貌,测量速度快,适于处理动态过程。本文研究了傅里叶变换轮廓术在鲤鱼尾鳍动态瞬时三维形态测量中的应用。采用投影云纹法在尾鳍表面产生包含三维形貌信息的云纹,由高速摄像机获取鱼尾鳍游动过程中的序列变形光栅条纹,再经过傅里叶变换、频谱滤波、逆傅里叶变换、相位解包裹等处理重建鱼尾鳍的瞬时三维形态,再现了鱼尾鳍的连续游动过程。本文提出的方法将给鱼类流体力学的研究提供一种新的测量方法和手段。

2 基本原理

如图 1 所示,将正弦条纹投影在被测物表

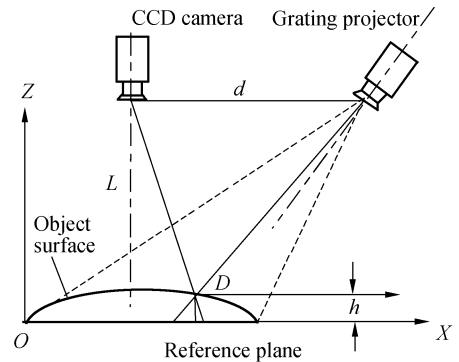


图 1 测量光路图

Fig. 1 Light path in experiments

面,并通过高速摄像机获取变形条纹图,序列变形条纹图的光强分布为^[6-7]:

$$g(x, y, t) = a(x, y, t) + b(x, y, t) \cos [2\pi f_0 x + \varphi(x, y, t)], \quad (1)$$

式中 $a(x, y, t)$ 为 t 时刻的背景光强, $b(x, y, t)$ 为 t 时刻物体表面非均匀的反射率, f_0 为载波频率, $\varphi(x, y, t)$ 是 t 时刻受物体高度调制的相位, 包含被测物体的三维信息。

令 $c(x, y, t) = b(x, y, t) \exp[i\varphi(x, y, t)]/2$, 则式(1)可表示为:

$$g(x, y, t) = a(x, y, t) + c(x, y, t) \exp(j2\pi f_0 x) + c^*(x, y, t) \exp(-j2\pi f_0 x). \quad (2)$$

其中 j 为虚数单位, $*$ 表示取共轭复数。对式(2)做一维傅里叶变换,取出集中在 f_0 附近的频谱并将之移回频谱原点,经一维傅里叶反变换,可得到 $c(x, y, t)$,从而可求得点 (x, y) 在 t 时刻的相位分布为:

$$\varphi(x, y, t) = \arctan \frac{\text{Im}[c(x, y, t)]}{\text{Re}[c(x, y, t)]}, \quad (3)$$

其中: Re 和 Im 表示取复数的实部和虚部。

公式(3)表明,相位场的分布 $\varphi(x, y, t)$ 不仅与 x, y 有关,也与时间 t 有关,是一个截断在反三角函数主值区间 $(-\pi, \pi]$ 内的三维相位场。为了获得连续的真实相位分布,必须进行相位展开

运算。对于时间轴上的序列图像,相位场的展开不仅要在 x, y 二维面上进行,还应在 t 方向上展开以保证相邻时刻相位场的连续性。基于鱼尾鳍在运动过程中的形态特征,首先选取一点沿时间轴方向对每帧相应像素点进行时间域相位展开,再依据该点的相位值进行空间域相位展开,最终获得各时刻的连续相位场。

从相位展开得到的三维数组中直接提取各时刻的变形条纹相对于参考平面的相位差:

$$\Delta\varphi(x, y, t) = \varphi(x, y, t) - \varphi_0(x, y), \quad (4)$$

其中, $\varphi(x, y, t)$ 是 t 时刻受物体高度调制的相位, $\varphi_0(x, y)$ 为参考平面相位。

由图 1, 根据相位差与高度的对应关系

$$h(x, y, t) = \frac{\Delta\varphi(x, y, t)L}{\Delta\varphi(x, y, t) + 2\pi f_0 d} \approx \frac{\Delta\varphi(x, y, t)L}{2\pi f_0 d}, \quad (5)$$

得到被测物的瞬时三维形态, 式中 L 为 CCD 至参考平面的垂直距离(见图 1)。

3 实验结果

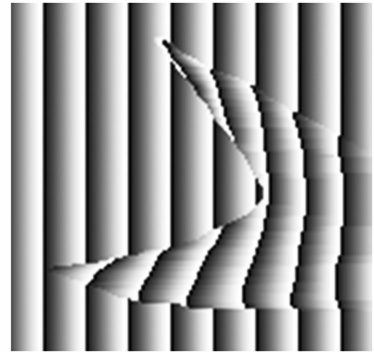
实验光路如图 1 示, 正弦光栅由计算机生成, 周期为 16 pixel, 由索尼 LCD 投影仪(白光光源, 分辨率为 1 024 pixel \times 768 pixel) 投射到被测物上。变形光栅图像由 Photron FASTCAM Viewer 高速摄像机采集^[8], 高速摄像机光轴与 z 轴平行, 采样频率为 1 000 frame/s, 采样分辨率为 512 pixel \times 512 pixel。变焦镜头的光圈调为最小, 焦距 $f = 25$ mm。

实验中共采集 2 048 帧序列图像, 分别对每帧图像运用傅里叶变换法获得包裹图, 并对尾鳍的包裹相位进行解包裹处理, 得到了各时刻的真实相位图, 从而得到尾鳍的瞬时形态, 再现了尾鳍的连续三维运动过程。图 2 为 960 ms 时刻的尾鳍云纹图、包裹相位图以及解包裹相位图, 构成尾鳍瞬时三维形态的恢复处理过程。图 3 分别为 560、960 和 1 360 ms 时刻的尾鳍三维形态及其上述三个时刻的空间相对位置。



(a)尾鳍云纹图

(a)Deformed fringe of tail fin



(b)包裹相位图

(b)Wrapped phases



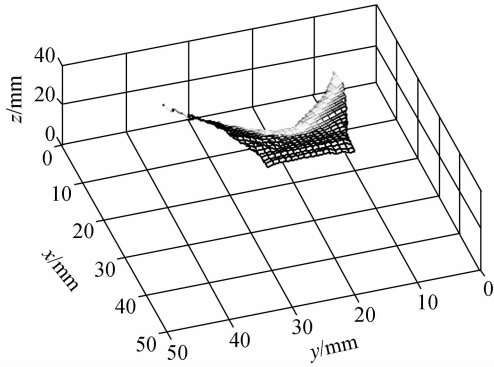
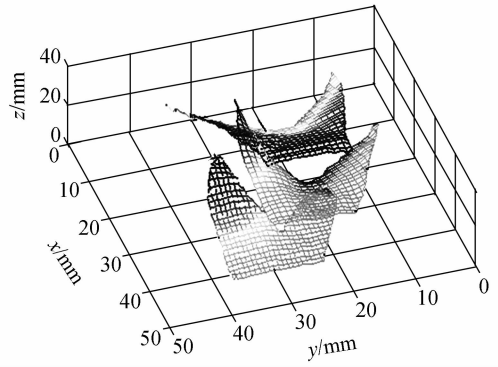
(c)去包裹相位图

(c)Unwrapped phases

图 2 $t = 960$ ms 的尾鳍云纹图

Fig. 2 Deformed fringe of tail fin at $t = 960$ ms

图 4 记录了尾鳍上叶叶尖的位移-时间曲线, 以从一侧最大位移到另一侧最大位移, 再返回为一个摆动周期, 尾鳍的摆动频率为 1.42 Hz。

(a) $t=560$ ms

(d) 相对空间位置

(d) Relative position in space

图 3 尾鳍瞬时三维形态

Fig. 3 Instantaneous profiles of tail fin

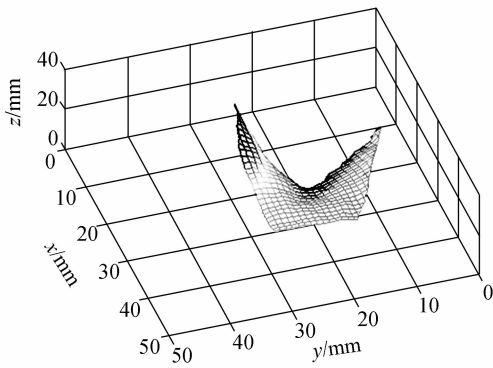
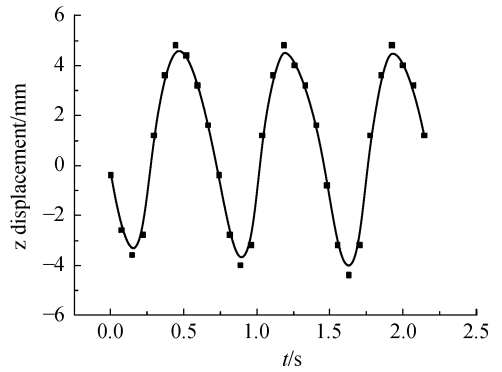
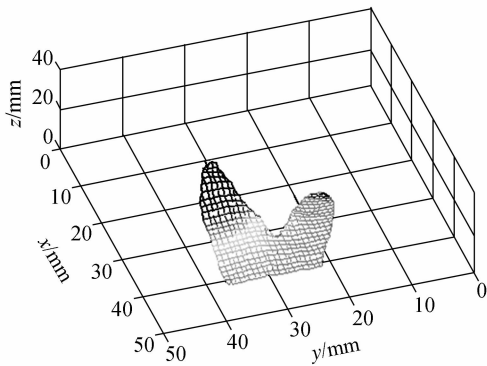
(b) $t=960$ ms

图 4 尾鳍上叶叶尖运动轨迹

Fig. 4 Swing track of dorsal tail-tip

(c) $t=1\ 360$ ms

4 结 论

本文运用傅里叶变换轮廓术测量了鲤鱼尾鳍的连续运动三维形态,由高速摄像机获取受尾鳍形态调制的序列变形条纹,经过傅里叶变换、带通滤波、逆傅里叶变换、相位解包裹等处理后重建了尾鳍的瞬时三维形态。实验结果表明,将三维形貌测量中的傅里叶变换轮廓术应用到鱼类运动学研究领域,能正确恢复尾鳍的瞬时三维形态,真实再现尾鳍复杂的三维动态变化过程。文中的测试分析方法为进一步研究鱼游动时尾鳍的作用,尾鳍摆动方式和摆动频率与鱼游动速度之间的关系,尾鳍与其周围流场之间的关系等打下了基础。

参考文献:

- [1] BOILY P, MAGNAN P. Relationship between individual variation in morphological characters and swimming costs in brook charr (*Salvelinus fontinalis*) and yellow perch (*Perca flavescens*) [J]. *J. Exp. Biol.*, 2002,205:1031-1036.
- [2] LAUDER G V, DRUCKER E G. Morphology and experimental hydrodynamics of fish fin control surfaces[J]. *IEEE J. Oceanic Eng.*, 2004,29:556-571.
- [3] OHLBERGER J, STAAKS G, HOLKER F. Swimming efficiency and the influence of morphology on swimming costs in fishes [J]. *J. Comp. Physiol. B*,2006,176:17-25.
- [4] FERRY L A, LAUDER G. V. Heterocercal tail function in leopard sharks: a three-dimensional kinematic analysis of two models [J]. *J. Exp. Biol.*, 1996,199:2253-2268.
- [5] WILGA C D, LAUDER G V. Three-dimensional

kinematics and wake structure of the pectoral fins during locomotion in leopard sharks *Triakis semifasciata* [J]. *J. Exp. Biol.*, 2000,203:2261-2278.

- [6] TAKEDA M, MUTOH K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement 3D object shapes [J]. *Appl. Opt.*, 1983,22(24):3977-3982.
- [7] 姜宇, 杨国辉. 基于光栅投影技术的刀具磨损三维特征提取方法[J]. *光学精密工程*, 2007,15(3):390-395.
- JIANG Y, YANG G H. 3D feature extract method for tool wear based on grating projection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(3):390-395. (in Chinese)
- [8] 蒋明, 何小元. 振动轮式微机械陀螺动态特性的光学测试[J]. *光学精密工程*, 2008,16(2):295-299.
- JIANG M, HE X Y. Optical testing of dynamic characteristic of vibrating wheel micromechanical gyroscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(2):295-299. (in Chinese)

作者简介:



蒋明(1961—),女,江苏苏州人,副教授,1983年,1988年分别于东南大学获得学士、硕士学位,现为东南大学博士研究生,主要从事光学测试方法及图像处理技术的研究。E-mail: cemjiang@tom.com



张曙(1960—),男,江苏苏州人,副教授,1983年,1988年分别于中国科学技术大学获得学士、硕士学位,主要从事计算机程序开发及图像处理技术的研究。E-mail:shu51@ustc.edu.cn

导师简介:



何小元(1956—),男,江苏泰兴人,教授,博士生导师,1982年于华东工程学院(现南京理工大学)获得学士学位,1987年于东南大学获得硕士学位,1994年于西南交通大学获得博士学位,主要从事微电子机械系统材料与结构动静态光学测试方法及图像处理技术的研究。E-mail:mmhxy@seu.edu.cn