

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104140

基于数字图像处理的柔性水翼形变测量*

董航^{1,2} 黎明^{1,2} 曲恒良^{1,2} 刘臻^{1,2}

(1. 中国海洋大学工程学院 青岛 266100; 2. 山东省海洋智能装备工程研究中心 青岛 266100)

摘要:针对振荡水翼式潮流能发电装置中柔性水翼的形变测量问题,设计了一套基于高速相机的非接触式测量系统,可在不影响水翼水动力学特性的前提下,连续采集水翼运动过程中的图像并计算水翼形变。建立了图像坐标系和水翼世界坐标系的坐标转换模型,给出了相关参数的标定方法和形变的计算公式。提出了一种基于Canny算子的水翼迎流面边缘检测方法,给出了边界的多项式拟合算式,从而可计算出水翼迎流面边缘上任一点的形变。设置了不同实验条件进行了验证,识别出的水翼总长度误差在2%以内,形变量符合实际规律。实验结果表明该方法能够有效测量水翼迎流面边缘上任一点的形变,且具有现场布置简单、不影响水动力学特性的优点。

关键词:潮流能发电;柔性水翼;数字图像;边缘检测;形变测量

中图分类号: TP391.4; TN957.52 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Deformation measurement of flexible hydrofoil based on digital image processing

Dong Hang^{1,2} Li Ming^{1,2} Qu Hengliang^{1,2} Liu Zhen^{1,2}

(1. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2. Shandong Ocean Intelligent Equipment Engineering Research Center, Qingdao 266100, China)

Abstract: A non-contact measurement system based on high-speed camera is designed for deformation measurement of flexible hydrofoil in oscillating hydrofoil tidal current power generation device, which can continuously collect images and calculate hydrofoil deformation without affecting hydrofoil hydrodynamic characteristics. The coordinate transformation model of image coordinate system and hydrofoil world coordinate system is established, and the calibration method of relevant parameters and the formula of deformation calculation are given. A new method of edge detection of the upstream surface of hydrofoil based on Canny operator is proposed and the polynomial fitting formula of the boundary is given. In this way the deformation of any point on the edge of the upstream surface of the wing can be calculated. Different experimental conditions are set to verify the results. The total length error of the identified hydrofoil is less than 2%, and the deformation is in line with the actual law. The experimental results show that the method can effectively measure the deformation of any point on the edge of the upstream surface of the hydrofoil, and has the advantages of simple field arrangement and no influence on the hydrodynamic characteristics.

Keywords: tidal current power generation; the flexible hydrofoil; digital image; edge detection; deformation measurement

0 引言

振荡水翼式潮流能发电装置是一种较新的潮流能获取装置,其工作过程类似于鱼尾摆动,是一种升沉和俯仰耦合的运动。水翼在潮流能作用下绕旋转轴进行周期性

的往复运动,带动发电机转动从而获得电能。振荡水翼式装置是一种较新的潮流能能量获取装置,有着启动速度小、受潮流不均匀性影响小、对周围环境影响小的优点^[1],具有很高的研究价值。

振荡水翼可分为刚性水翼和柔性水翼,从仿生学的角度,柔性水翼更贴近于自然,受到研究者的高度关

注^[2-4]。柔性水翼在运动过程中,水翼发生形变,有效攻角改变,引发前缘涡变化^[4],从而影响水翼上下表面的压力分布,进而改变水翼的获能量^[1]。水翼形变是一个双向流固耦合问题,既需要研究水对水翼的作用,也需要研究水翼对水的作用,再加上水翼本身的耦合运动、惯性力等因素,使得该研究比普通流固耦合问题更加复杂。为了优化柔性水翼的设计,需要研究水翼形变对获能的影响机理。因此,在不影响叶片水动力学特性的基础上,快速准确测量出柔性水翼的形变具有重要的意义。

在形变测量中,根据测量时是否需要接触被测物体的表面,可将形变测量分为接触式测量与非接触式测量。接触式测量需要在柔性水翼上安装传感器,这将会改变水翼的水动力学特性,从而影响对于获能机理的分析。因此,本文采用了非接触式的测量方法。非接触式形变测量方法包括光学法和非光学法,非光学法包括磁学、声学、X 射线等测量方法,光学法则包括结构光法^[5-7]、激光测量法^[8-9]和数字图像测量法^[10-12]等。

基于数字图像处理的形变监测方法在梁形变、金属等材料形变^[13-15]、桥梁裂缝^[16-18]、轨道监测^[19]等结构形变领域有成功应用。其基本思路是,采用数字图像里边缘检测的方法提取边缘特征点,拟合边缘后与未形变边缘对比,进一步计算形变量。柔性水翼形变与它们类似,但其具有干扰复杂、形变动态变化的特点,识别难度更大。

1 振荡水翼实验装置及形变测量系统

1.1 振荡水翼实验装置及形变测量系统总体结构

为了研究振荡水翼式潮流能装置的运行规律及水翼特性,设计的实验装置如图 1 所示,装置通过控制电机最多模拟两个柔性水翼的运动,并同步采集记录运动时电机的扭矩、转角等参数。

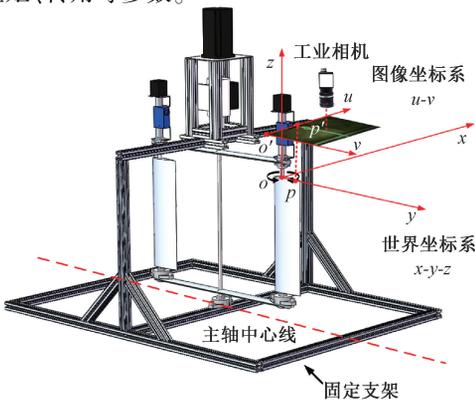


图 1 形变测量装置

Fig. 1 Deformation measuring device

装置的主轴电机与固定支架相连,带动两个副轴绕主轴旋转,副轴电机与水翼相连带动水翼绕副轴旋转,本文水翼选为柔性水翼。

水翼的形变测量装置由工业相机和计算机构成,工业相机的安装位置如图 1 所示,相机垂直向下拍摄图像,相机视角中装置的顶视图如图 2 所示,图中水翼发生形变。

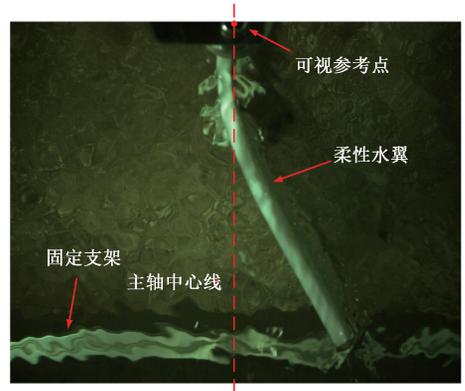


图 2 形变测量装置拍摄的图像

Fig. 2 Top view of deformation measuring device

相机采用了 MIMACRO 公司的 MI-130U210M/C 型号工业相机,具体参数如表 1 所示。相机的帧率高达 210 fps,考虑到水翼的运动速度、计算代价等因素,最终确定每秒采集和存储 35 张图片。

表 1 相机参数表

Table 1 Camera Parameters Table

分辨率@ 帧率	像元尺寸	位深	相机颜色	数据接口
1280×1024@ 210fps	4.8 μm	8 bit	彩色	USB3.0

世界坐标系 Oxy 平面选取为柔性水翼上平面所在的平面,原点 O 为水翼的旋转轴心, z 轴为垂直于 Oxy 平面,方向向上。图像坐标系 $O'uv$ 平面则选取坐标原点 O' 为图像左上角, u 轴为图像列数, v 轴为图像行数。在装置安装中,确保 Oxy 平面平行于 $O'uv$ 平面,因此该测量类似于不考虑 z 轴方向的平面测量^[20]。

受到相机视野限制,在实际得到水翼图像中无法拍到水翼的旋转轴心,但能包括 Oxy 平面中,沿 y 方向距离轴心距离为 s 的一处圆形凸起。因此选取圆形凸起的圆心 P 作为可视参考点,对应为图像坐标系 $O'uv$ 中的 P' 点,其坐标为 $(u_{p'}, v_{p'})$ 。因此图像坐标系 $O'uv$ 中的一点 (u, v) 与世界坐标系下对应点 (x, y) 之间的转换关系如式(1)所示。

$$\begin{cases} x = (u - u_{p'})d_u \\ y = (v - v_{p'})d_v + s \end{cases} \quad (1)$$

式中: s 为可视参考点与旋转轴心之间的实际距离; d_u 和

d_u 分别为 u 轴和 v 轴方向图像像素间距到世界空间距离的映射关系。

d_u 和 d_v 需通过在初始位置静止未形变时的柔性水翼进行标定,水翼在实验时没有淹没在水中,不存在光折射影响。公式如式(2)所示。

$$\begin{cases} d_u = \frac{W}{n_u} \\ d_v = \frac{D}{n_v} \end{cases} \quad (2)$$

式中: D 是未形变柔性水翼截面长边实际物理尺寸; W 为宽边实际物理尺寸; n_u 和 n_v 分别为是图像中长边和宽边所占的像素点个数。

1.2 水翼运动规律及控制

受到鱼类尾部摆动的启发,水翼通过合适的升沉和俯仰耦合的振荡运动从来流中获取能量,升沉和俯仰运动都定义为正弦运动。本文的装置中由主轴旋转来模拟升沉运动,副轴旋转来模拟俯仰运动。

本文主要研究副轴按规律运动,主轴锁死不运动时的柔性水翼形变。副轴的运动方程为:

$$\alpha = \alpha_0 \cos(2\pi ft) \quad (3)$$

式中: α 是副轴的旋转角度; α_0 是副轴的摆动角度幅度; f 是副轴摆动频率; t 是运动时间。在这里规定旋转角度的 0° 为主轴、副轴处于正中央时的角度,逆时针为正,顺时针为负。

在运动中,柔性水翼会受力产生形变,一个运动周期里形变如图 3 所示。在不同的运动时刻,水翼的形变程度是不同的,测量运动过程中各个时刻水翼的形变量至关重要。

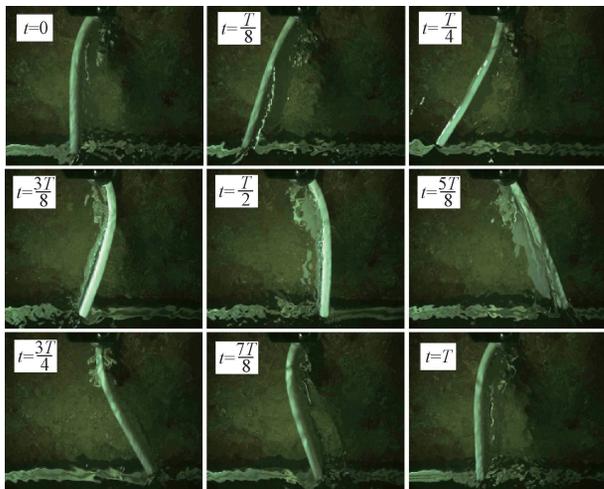


图 3 柔性水翼形变示意图

Fig. 3 Deformation diagram of flexible hydrofoil

2 振荡水翼形变测量原理

柔性水翼在运动时如图 4 所示,菱形填充部分为柔性水翼的刚性支撑部分,含有柔性水翼的旋转轴心,这部分在运动中不会发生形变。横线填充部分为柔性水翼的柔性部分,运动中在水流阻力的作用下会发生形变。

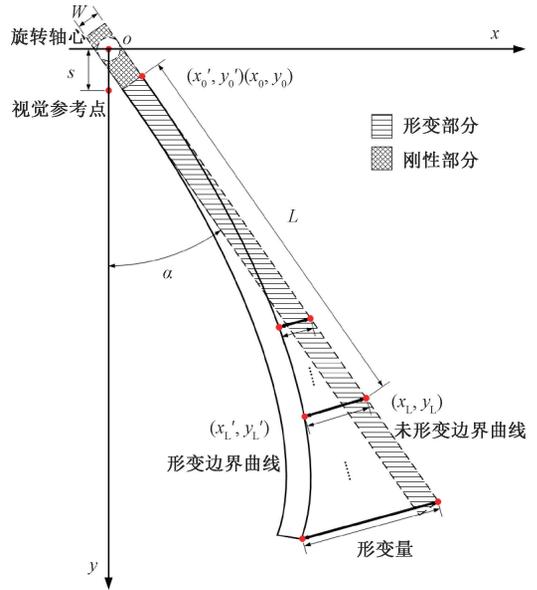


图 4 形变测量示意图

Fig. 4 Deformation measurement diagram

假设未形变的水翼边界如图 4 中虚线所示,其轴线与 y 轴的夹角为电机的转角 α ,则其迎流面的边界曲线如式(4)。

$$y_1(x) = \tan\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \cdot x + \frac{W}{2} \sqrt{\left(\tan\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)\right)^2 + 1} \quad (4)$$

式中: W 为水翼宽边实际长度。

水翼形变后的迎流面边界曲线如实线所示,边界曲线采用图像识别来识别特征点,用 n 阶多项式拟合的方法得到方程如式(5)所示。

$$y_2(x) = \sum_{i=0}^n \lambda_i x^i \quad (5)$$

由于柔性水翼在弯曲过程中长度不变化,则按照曲线距离端点长度相等的原则,给定长度 L ,根据距离公式式(6)以及两边界曲线方程式(4)和(5),首先计算出在理想未形变水翼边界上到端点距离为 L 的点的坐标 (x_L, y_L) ,再计算出对应于形变的水翼边界上的点的坐标 (x'_L, y'_L) 。

$$L = \int_{x'_0}^{x'_L} \sqrt{1 + y_2'(x)^2} dx = \sqrt{(y_L - y_0)^2 + (x_L - x_0)^2} \quad (6)$$

则柔性水翼长度为 L 处的形变量 μ_L 定义为 (x_L, y_L) 和 (x'_L, y'_L) 两点之间的直线距离,如式(7)所示。

$$\mu_L = \sqrt{(x'_L - x_L)^2 + (y'_L - y_L)^2} \tag{7}$$

3 柔性水翼形变测量算法

拍摄的运动中的柔性水翼形变图像如图 5 所示,图 5 有如下特征。

- 1) 柔性水翼与水池背景区分明显。
- 2) 柔性水翼迎流面边界清晰,易于识别。
- 3) 柔性水翼背流面和末端激起的水涡较多,水池底部存在浅色斑点,增加了图像识别的难度。
- 4) 受到相机视野限制,柔性水翼的旋转轴未包括在图像中,但视觉参考点成像效果清晰。
- 5) 视觉参考点所在图片的上端区域的图像特点与水翼所在的下端区域图像特点差异明显。



图 5 水翼图像
Fig. 5 Hydrofoil image

基于以上分析,设计得到柔性水翼形变识别算法,流程如图 6 所示。

- 1) 图像分割,将参考点所在区域和水翼所在区域图像进行分割,便于后续的认识。
- 2) 视觉参考点识别,从原图中提取圆形凸起区域的图像单独识别,对其进行二值化处理,对二值化后的图像使用 Canny 算子进行边缘检测,剔除干扰后,对边界点拟合圆,得到圆心作为视觉参考点。
- 3) 坐标变换,由式(1)得到图像上的点在以转轴为原点的世界坐标系中的坐标。
- 4) 理想未变形的的水翼边界计算,用电机转角,根据式(4)计算理想未形变的水翼边界线方程。
- 5) 水翼迎流面边界识别与拟合,与参考点提取过程类似,先对图像进行二值化处理,对二值化后的图像使用 Canny 算子进行边缘检测,剔除干扰后,提取得到迎流面边界点。用多项式拟合得到形变后水翼边界线。
- 6) 计算距离 L 处的形变量: 给定距离序列,由

式(4)~(6)计算坐标,再根据式(7)计算形变量。

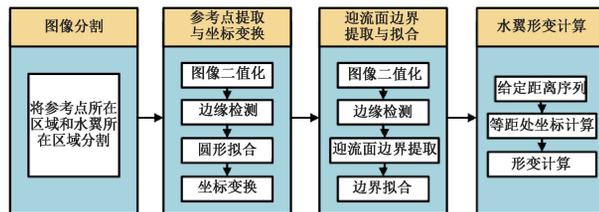


图 6 算法流程
Fig. 6 Algorithm flow

3.1 视觉参考点提取与坐标变换

经过图像分割,截取圆形凸起区域的图像进行单独处理,图像中亮处为圆形凸起的金属边框,拟识别边框内圈。如图 7 所示。截取后对其进行二值化处理,再经过 Canny 算子检测边缘,剔除面积较小的连通区域,留下圆形凸起的边界曲线,最后用圆拟合边界,得到的圆的圆心则为视觉参考点。

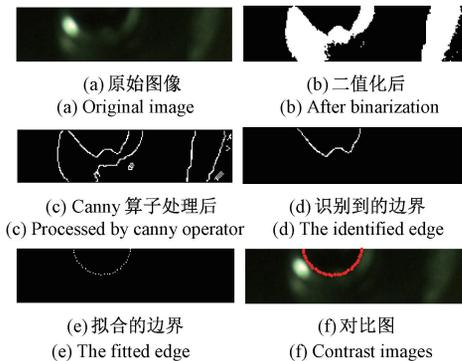


图 7 参考点识别过程

Fig. 7 Reference point identification process diagram

在得到视觉参考点的图像坐标后,通过式(1)进行坐标变换,图像上的任意一点则都可通过式(1)在世界坐标系中表示。

3.2 迎流面水翼边界提取与拟合

对于水翼边界的提取,过程类似于视觉参考点提取,如图 8 所示。首先对其进行二值化处理,之后使用 Canny 算子进行边缘检测,剔除面积较小的连通区域,留下连通区域就含有水翼的迎流面边界,最后从迎流方向向背流方向扫描获得水翼迎流面边界。

为了计算柔性水翼的形变量,在如图 4 所示坐标系中描绘出水翼理想未形变边界线和水翼实际边界线。

柔性水翼理想的未形变边界线由式(4)推算得到。柔性水翼实际的形变后边界线可用高阶多项式对水翼迎流面特征点进行拟合得到,测试发现 6 阶多项式效果较好。

最终拟合两曲线在世界坐标系中如图 9(a)所示,结

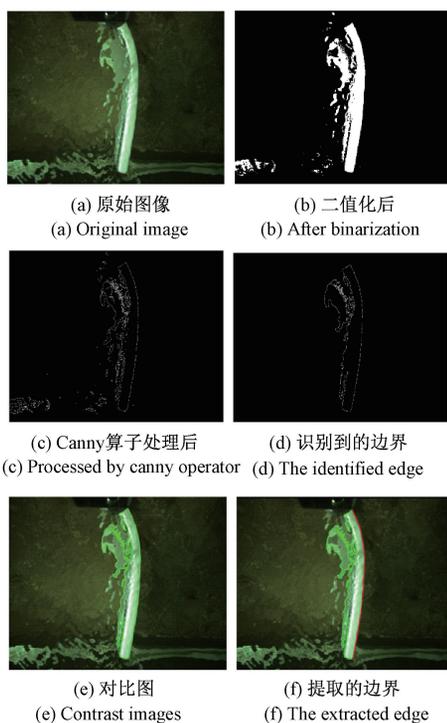


图 8 水翼边界识别过程

Fig. 8 Hydrofoil edge identification process diagram

果在原图中展示如图 9(b) 所示。

3.3 水翼形变计算

在得到两条边界线之后,则可根据给定长度序列,根据式(4)~(6)提取长度相等的点的坐标值,根据两个点的坐标值,由式(7)计算得到柔性水翼在该长度处的形变量。

4 实验数据验证

基于上述实验装置和测量系统,对不同的水翼运动共做了 4 组实验,每组实验挑选其中的 25 张图像进行处理,实验参数如表 2 所示,水翼参数如表 3 所示。

表 2 实验参数表

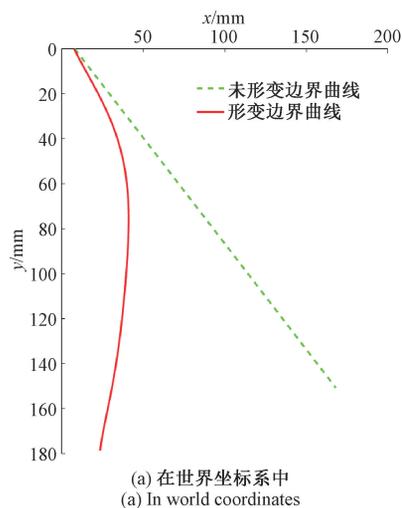
Table 2 Experimental parameter table

序号	摆动幅值/(°)	摆动频率/Hz
1	30	0.4
2	45	0.4
3	60	0.4
4	75	0.4

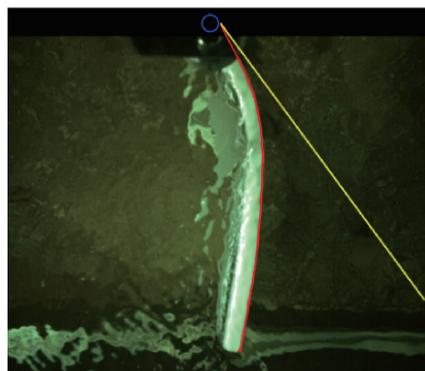
表 3 水翼参数表

Table 3 Hydrofoil parameter table

参数名	水翼宽度	水翼长度	刚性部分长度	形变部分长度	转轴到末端长度
长度/mm	8	200	14	178	192



(a) 在世界坐标系中
(a) In world coordinates



(b) 在原图中
(b) In the original image

图 9 结果展示图

Fig. 9 Results display image

4.1 算法准确性验证

在得到数据后,首先对算法识别的准确性进行验证,本文计算水翼形变后边界线的长度 p 和水翼未形变边界线的实际长度 p_0 的差值与水翼未形变边界线实际长度之比 e 来衡量准确性,如式(8)所示。

$$e = \frac{p - p_0}{p_0} \times 100\% \quad (8)$$

选取了各组实验中的几个典型时刻进行计算,典型时刻分别为电机转角等于摆动幅值、摆动幅值的 1/2 和 0 处,具体结果如表 4 所示。

分析表 4 可以发现,对于识别结果中, e 在 $\pm 2\%$ 以内,对于长度测量的误差较小,可以用来测算水翼的形变量。

4.2 算法测量结果及分析

在验证了方法的准确性后,使用该方法对 4 个实验的图像进行处理,计算水翼形变量。

不同实验条件下,旋转角度从 $-\alpha_0$ 开始的一个完整运动周期中的水翼末端形变量计算结果如图 10 所示。在各实验条件下,旋转角度从 $-\alpha_0$ 开始的一个完整运动

周期中的水翼不同长度处的形变量计算结果如图 11 所示。

表 4 长度计算结果表

Table 4 Length Calculation Results Table

序号	$\alpha = \alpha_0$	$\alpha = 0.5\alpha_0$	$\alpha = 0$	$\alpha = -0.5\alpha_0$	$\alpha = -\alpha_0$
1	189.625	192.585	193.51	190.18	191.845
2	189.995	190.735	191.29	192.4	191.475
3	189.875	192.08	194.64	194.16	191.76
4	191.86	192.39	191.33	194.775	195.835
p					
1	-1.24	0.30	0.79	-0.95	-0.08
2	-1.04	-0.66	-0.37	0.21	-0.27
3	-1.11	0.04	1.37	1.13	-0.13
4	-0.07	0.20	-0.35	1.45	2.00
$e/\%$					
1					
2					
3					
4					

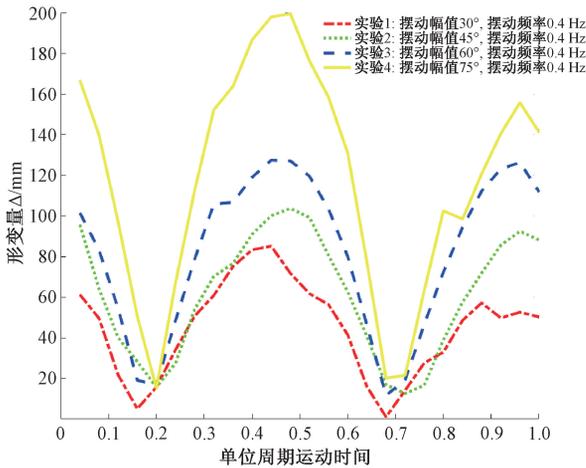
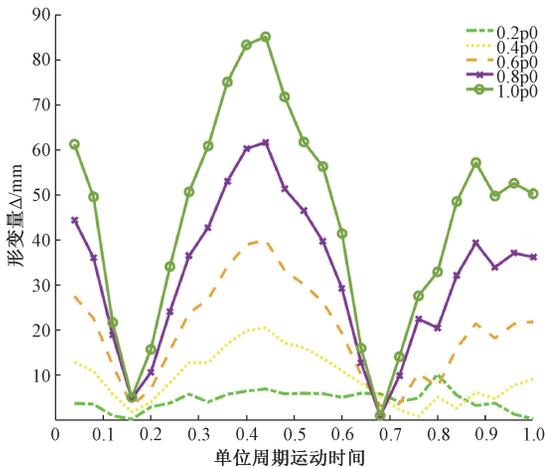


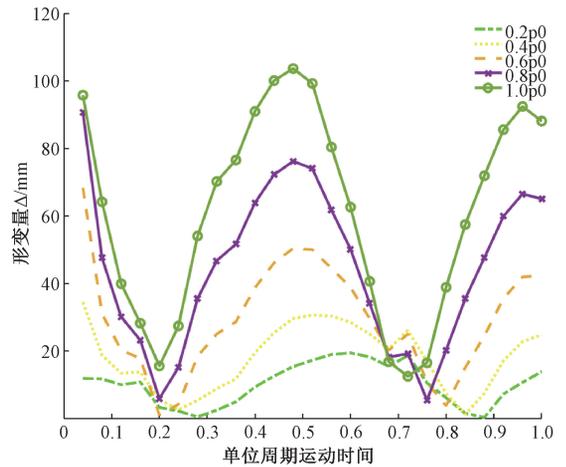
图 10 形变量计算结果

Fig. 10 Calculation results of deformation quantity



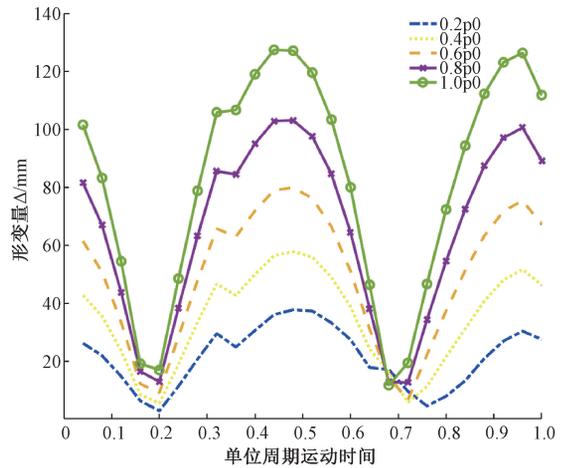
(a) 实验1条件下不同长度形变量

(a) Deformation quantity of different lengths in experiment 1



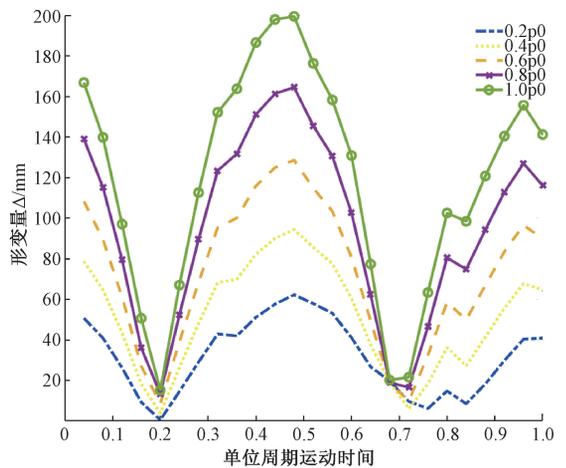
(b) 实验2条件下不同长度形变量

(b) Deformation quantity of different lengths in experiment 2



(c) 实验3条件下不同长度形变量

(c) Deformation quantity of different lengths in experiment 3



(d) 实验4条件下不同长度形变量

(d) Deformation quantity of different lengths in experiment 4

图 11 形变量计算结果

Fig. 11 Calculation results of deformation quantity

在水翼运动的过程中,摆动频率不变,增大摆动幅值,会使水翼两端速度差增大,末端的形变量随之增大。

而对于同一实验条件下,随着长度 L 增大,形变量也会增大。图 10 和 11 的结果均符合实际规律,因此本文方法可以解决柔性水翼的形变测量问题。

5 结 论

本文将基于数字图像边缘检测的形变测量方法应用到了柔性水翼的形变测量中,该方法能较为准确的识别并计算出水翼迎流面上各点的形变量,具有现场布置简单、不影响水动力学特性的优点。

本文方法也存在部分图像的二值化阈值需要调整、水流干扰无法完全去除的问题。在未来的工作中可以考虑采用颜色对比更为明显的背景、使用更优秀的边缘检测算法或使用图像增强算法增加对比度来去除干扰。

参考文献

- [1] 关代涛. 弦向柔性对振荡水翼潮流能能量获取性能影响研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2019.
GUAN D T. Study of chordwise flexibility on the tidal current energy extraction performance of an oscillating hydrofoil [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019.
- [2] LIU W, XIAO Q, CHENG F. A bio-inspired study on tidal energy extraction with flexible flapping wings[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2013, 8(3):036011.
- [3] LE T Q, KO J H. Effect of hydrofoil flexibility on the power extraction of a flapping tidal generator via two- and three-dimensional flow simulations [J]. *Renewable Energy*, 2015, 80:275-285.
- [4] XU J, SUN H, TAN S. Wake vortex interaction effects on energy extraction performance of tandem oscillating hydrofoils [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2016, 30(9):4227-4237.
- [5] 李茂月,马康盛,许勇浩,等. 基于单目结构光的形貌测量误差补偿方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(5): 19-31.
LI M Y, MA K SH, XU Y H, et al. Research on morphology measurement error compensation method based on the monocular structure light [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(5): 19-31.
- [6] 袁腾飞,吴思进,李伟仙,等. 数字散斑干涉面内变形内窥测量方法研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2019, 33(7): 93-98.
YUAN T F, WU S J, LI W X, et al. Research on method of endoscopic measurement of in-plane deformation using digital speckle pattern interferometry [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2019, 33(7): 93-98.
- [7] 贺丽娟. 高速铁路轨道基础变形计算方法研究[J]. *电子测量技术*, 2020, 43(3):49-53.
HE L J. Study on deformation calculation method of high-speed railway track foundation [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2020, 43(3):49-53.
- [8] 孙有春,庞亚军,白振旭,等. 激光三角测量法应用技术[J]. *激光杂志*, 2021, 42(4): 1-8.
SUN Y CH, PANG Y J, BAI ZH X, et al. Application technology of laser triangulation [J]. *Laser Journal*, 2021, 42(4): 1-8.
- [9] GAZAFRUDI M M G S, YOUNESIAN D, TORABI M. A high accuracy and high speed imaging and measurement system for rail corrugation inspection[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68(9): 8894-8903.
- [10] 王永红,王欢庆,吴双乐,等. 基于机器视觉的材料力学性能全场测量方法[J]. *测控技术*, 2020, 39(8): 35-46.
WANG Y H, WANG H Q, WU SH L, et al. Full-field measurement method of mechanical properties of materials based on machine vision [J]. *Measurement & Control Technology*, 2020, 39(8): 35-46.
- [11] 刘长博. 基于数字图像相关方法的非接触测量技术及其在土体变形中的应用[D]. 北京:北京交通大学, 2020.
LIU CH B. Non-contact measurement technique based on digital image correlation method with its application to geotechnical deformation [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [12] 钟俊杰,邵珩,聂中原,等. 三维数字图像相关系统及其应用研究[J]. *新技术新工艺*, 2020(4): 54-59.
ZHONG J J, SHAO H, NIE ZH Y, et al. Research on three-dimensional digital image correlation system and its application [J]. *New Technology and New Process*, 2020 (4): 54-59.
- [13] 谢柳辉,冯晓蕾,周晓,等. 基于机器视觉的金属结构变形测量[J]. *自动化与仪表*, 2020, 35(12): 50-53.
XIE L H, FENG X L, ZHOU X, et al. Deformation measurement of metal structure based on machine vision [J]. *Automation & Instrumentation*, 2020, 35(12): 50-53.
- [14] 李先报. 基于机器视觉的材料拉伸应变测量[D]. 长春:吉林大学, 2020.
LI X B. Tensile strain measurement of materials based on machine vision [D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [15] 潘广娟. 基于数字图像处理的复材构件变形测量研究[D]. 大连:大连理工大学, 2020.
PAN G J. Research on deformation measurement of composite materials based on digital image processing [D].

Dalian : Dalian University of Technology, 2020.

- [16] 丁威. 基于图像的桥梁裂缝检测理论与实践[D]. 广州:华南理工大学, 2020.
DING W. Theory and practice of bridge crack detection based on image[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [17] 杨松, 邵龙潭, 郭晓霞, 等. 基于骨架和分形的混凝土裂缝图像识别算法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(8): 1850-1855.
YANG S, SHAO L T, GUO X X, et al. Skeleton and fractal law based image recognition algorithm for concrete crack [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(8): 1850-1855.
- [18] HUANG S, DING W, HUANG Y. An accurate image measurement method based on a laser-based virtual scale[J]. Sensors, 2019, 19(18): 3955.
- [19] WANG S M, LIAO C L, NI Y Q. A machine vision system based on driving recorder for automatic inspection of rail curvature [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(10): 11291-11300.
- [20] 尹英杰, 徐德, 张正涛, 等. 基于单目视觉的平面测量[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(4): 347-352.
YIN Y J, XU D, ZHANG ZH T, et al. Plane measurement based on monocular vision[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2013, 27(4): 347-352.

作者简介



董航, 在 2019 年于中国海洋大学获得学士学位, 现为中国海洋大学工程学院硕士研究生, 主要研究方向为智能感知与自主控制。

E-mail: donghang@stu.ouc.edu.cn

Dong Hang received his B. Sc. degree from Ocean University of China in 2019. Now he is a M. Sc. candidate at Ocean University of China. His main research

interests include intelligent perception and autonomous control.



黎明 (通信作者), 分别在 1997 年和 2003 年于东北大学获得学士学位和博士学位, 现为中国海洋大学工程学院教授, 主要研究方向为智能感知与自主控制、海洋仪器和海洋能发电系统控制。

E-mail: limingneu@ouc.edu.cn

Li Ming (Corresponding author) received his B. Sc. and Ph. D. degrees both from Northeastern University in 1997 and 2003, respectively. Now he is a professor at Ocean University of China. His main research interests include intelligent perception and autonomous control, marine instruments, control of marine renewable energy systems.



曲恒良, 分别在 2014 年和 2017 年于中国海洋大学获得学士学位和硕士学位, 现为中国海洋大学工程学院博士研究生, 主要研究方向为海洋可再生能源。

E-mail: quhengliang@stu.edu.cn

Qu Hengliang received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Ocean University of China in 2014 and 2017, respectively. Now he is a Ph. D. candidate at Ocean University of China. His main research interest includes marine renewable energy.



刘臻, 2002 年于青岛海洋大学获得学士学位, 2008 年在中国海洋大学获得博士学位, 现为中国海洋大学工程学院教授, 主要研究方向为海洋可再生能源开发与利用和港口、海岸及近海工程。

E-mail: liuzhen@ouc.edu.cn

Liu Zhen received his B. Sc. degree from Ocean University of Qingdao in 2002 and Ph. D. degree from Ocean University of China in 2008. Now he is a professor at Ocean University of China. His main research interests include development and utilization of marine renewable energy and port, coastal and near shore engineering.