

基于数字图像相关的水下螺旋桨三维变形测量

潘济宇^{1,4}, 张水强², 苏志龙^{1,4*}, 武坤³, 张东升^{1,4**}

¹上海大学力学与工程科学学院上海市应用数学与力学研究所, 上海 200444;

²湖州师范学院工学院, 浙江 湖州 313000;

³中国船舶科学研究中心江苏省绿色船舶技术重点实验室, 江苏 无锡 214082;

⁴上海市能源力学重点实验室, 上海 200444

摘要 提出了一种基于三维数字图像相关(3D-DIC)技术的船用螺旋桨 3D 变形测量方法。测量系统由双目立体相机、闪光灯和同步装置组成,采用空泡水筒对螺旋桨进行加载。首先,用基于极线约束的自标定方法对系统的外部参数进行标定,以获得桨叶表面的 3D 位移分布。然后,对重构的桨毂部分进行点云配准,得到变形后螺旋桨叶根部点云的平移向量和旋转矩阵,以消除桨毂位置差异导致的刚体位移。最后,构建了空气-玻璃-水三种介质的折射光路,对 3D 重构的物点坐标进行折射修正,得到空泡水筒中桨叶的真实 3D 形貌。实验结果表明,用本方法对空泡水筒中螺旋桨的变形情况进行测量,可得到螺旋桨叶片在固定相位下的全场 3D 位移分布,为船用螺旋桨的变形测量提供了一种可行的非接触、全场测量方案。

关键词 测量与计量; 三维变形测量; 数字图像相关; 相机自标定; 折射修正

中图分类号 O348.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1212001

Measuring Three-Dimensional Deformation of Underwater Propellers Based on Digital Image Correlation

Pan Jiyu^{1,4}, Zhang Shuiqiang², Su Zhilong^{1,4*}, Wu Shen³, Zhang Dongsheng^{1,4**}

¹School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

²School of Engineering, Huzhou University, Huzhou, Zhejiang 313000, China;

³China Ship Scientific Research Center, Jiangsu Key Laboratory of Green Ship Technology, Wuxi, Jiangsu 214082, China;

⁴Shanghai Key Laboratory of Mechanics in Energy Engineering, Shanghai 200444, China

Abstract We propose a method of measuring the three-dimensional (3D) deformation of marine propellers based on 3D digital image correlation technology. The measurement system is composed of a binocular stereo cameras, a flash, and a synchronization device, and a propeller is loaded by a cavitation tunnel. First, the self-calibration method based on epipolar constraint is used to calibrate the external parameters of the system to obtain the 3D displacement distribution of the blade surface. Then, the point cloud registration is performed on the reconstructed hub, we acquire the translation vector and rotation matrix of the point cloud at the deformed blade root to eliminate the rigid body displacement caused by different hub positions. Finally, the refracted light paths through air, glass, and water are constructed, and refraction correction is performed on the reconstructed 3D coordinates of the object

收稿日期: 2020-11-13; 修回日期: 2020-12-08; 录用日期: 2021-01-18

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFF01014200)、国家自然科学基金(12002197,12072184)、中国博士后科学基金第 67 批面上资助(2020M671070)、上海市“超级博士后”资助计划(2019192)、江苏省绿色船舶技术重点实验室基金(2019Z09)、浙江省自然科学基金/探索项目 Q(LQ20A020001)

* E-mail: zhilong8845@shu.edu.cn; ** E-mail: donzhang@staff.shu.edu.cn

point to obtain the real 3D shape of the blades in the cavitation tunnel. Measuring the propeller deformation in the cavitation tunnel with our method can get the full-field 3D displacement distribution of the propeller blades at a fixed phase, which provides a feasible non-contact full-field scheme for measuring the deformation of marine propellers.

Key words measurement and metrology; three-dimensional deformation measurement; digital image correlation; camera self-calibration; refraction correction

OCIS codes 120.3940; 150.1135; 100.4999

1 引言

船用螺旋桨是船舶最常用的推进装置,桨叶的力学设计直接影响着船舶的动力、安全性与舒适性。实际工程中,为了优化螺旋桨叶片的结构,需对螺旋桨原型在工作状态下的变形情况进行测量分析^[1-2]。螺旋桨测试往往需要在水下进行(如采用空泡水筒加载),传统的电测量或机械测量技术很难实施,使桨叶变形数据的采集成为一项颇具挑战性的任务^[3-4]。因此,需要对空泡水筒中螺旋桨叶片的全场三维(3D)变形进行测量分析,进而为螺旋桨的优化设计提供必要依据。

3D 数字图像相关(3D-DIC)技术是一种全场光学变形测量技术,通过跟踪和恢复编码在立体图像序列中变形体的 3D 形貌数据获得位移和变形信息^[5-6];且 3D-DIC 技术具有非接触测量、实验装置简单、对环境要求低等优点^[7],在材料和生物组织力学性能测试^[8-10]、工程结构健康监测^[11-12]和振动测量^[13-14]等领域得到了广泛的应用。Sicard 等^[15]基于 3D-DIC 技术测量了飞机螺旋桨叶片的变形情况,其中,相机被安装在飞机外部的非移动部件上,并通过外部信号触发立体相机和闪光灯同步采集图像。Wu 等^[16-17]基于 3D-DIC 技术获得了风力发电机叶片的变形数据,实现了风机叶片的动力学响应分析。这些 3D-DIC 系统的建立和发展为船用螺旋桨叶片的全场变形测量提供了一种可行方法,但船用螺旋桨须在密封的空泡水筒中加载,无法用传统技术对立体相机进行完全标定,如张氏标定法;此

外,相机和叶片处在不同的介质中,光线折射会引起严重的测量误差。

为了解决上述问题,本文在传统 3D-DIC 测量的基础上提出了一种测量空泡水筒中螺旋桨叶片变形的的方法。首先,为了采集固定相位下的螺旋桨叶片图像,通过外部硬触发方式控制立体相机和闪光灯同步工作;然后,用张氏标定法标定立体相机的内部参数,并用基于极线约束的自标定方法得到立体相机的相对外参;最后,用点云匹配算法对旋转前后桨毂部分的三维点进行配准,消除桨毂位置差异导致的刚体位移。为了修正折射对三维重构结果的影响,还构建了空气-玻璃-水三种介质的折射光路,得到桨叶的真实三维位移信息,并通过实验验证了本方法在桨叶三维变形测量方面的可行性。

2 测量原理

2.1 3D-DIC 相机系统标定

3D-DIC 测量中的立体相机系统由相机 C_0 和 C_1 组成,通常用基于平面目标的张氏标定法确定各相机的内参和相机之间的外参^[18-19]。由于螺旋桨在密封的空泡水筒中工作,无法直接使用张氏标定法获得相机系统的外参,因此,对内外参进行分离标定。首先,用张氏标定法获得两个相机的内参和畸变系数,采用的棋盘格标定目标在两个相机中的图像如图 1 所示。然后,用基于极线约束的直接线性变换(DLT)方法确定两个相机之间的相对外参^[20-21]。

DLT 方法不需要已知的三维点信息,是一种外参自标定方法。对于已标定的相机,DLT 方法直接

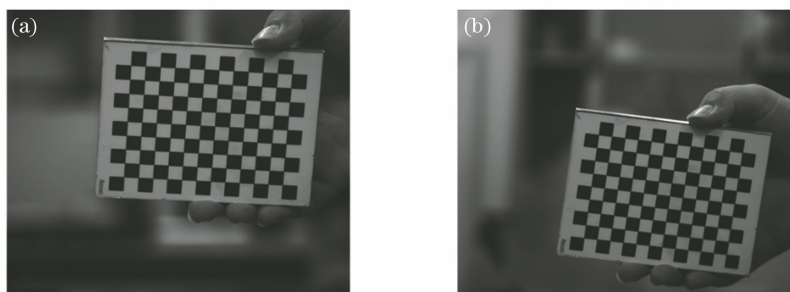


图 1 不同相机的棋盘格图像。(a)相机 C_0 ; (b)相机 C_1

Fig. 1 Chessboard images of different cameras. (a) Camera C_0 ; (b) camera C_1

根据左右图像中对应点的像素坐标求解表示外部成像的本质矩阵,进而通过线性分解方法得到相机之间的旋转矩阵和平移向量。因此,先利用图像相关算法在一对螺旋桨叶片图像中进行特征匹配,得到一对匹配点。任意一对匹配点的像素坐标服从的极线约束关系可表示为

$$p_l^T F p_r = 0, \quad (1)$$

式中, p_l 和 p_r 分别为左右图像上匹配点像素坐标的齐次形式, F 为包含两个相机内参和相机间相对外参的基础矩阵,可表示为

$$F = K'^{-T} [t]_{\times} R K^{-1}, \quad (2)$$

式中, K 和 K' 分别为相机 C_0 和 C_1 的内参矩阵, R 和 t 分别为待求解相机 C_1 相对于相机 C_0 的旋转矩阵和平移向量, $[t]_{\times}$ 为平移向量 t 的反对称矩阵。用张氏标定法确定相机内参矩阵 K 和 K' 后,根据针孔成像模型得到 p_l 和 p_r 对应的归一化左、右图像坐标分别为 $x_l = K^{-1} p_l$ 和 $x_r = K'^{-1} p_r$, 代入(1)式可得到

$$x_l^T E x_r = 0, \quad (3)$$

式中, $E = K'^T F K$ 为包含相机系统外部参数的本质矩阵。结合基础矩阵 F 得到本质矩阵与外参的关系为 $E = [t]_{\times} R$ 。可以发现,系统外参与归一化图像中点的对应关系存在线性关系,因此可使用 DLT 方法求解 R 和 t 。

如果不考虑相对平移向量 t 的尺度信息,相对外参包括 3 个独立的旋转分量和 2 个独立的平移分量,即本质矩阵 E 的自由度为 5,确定矩阵 E 最少需要 5 对立体特征点。图 2 为外参标定中特征匹配的部分结果,可以发现,实验中匹配的特征点比较丰富。为了消除误匹配点和匹配误差较大的点对本质矩阵估计的影响,结合随机采样一致性(RANSAC)算法和 8 点法求解矩阵 E ^[20]。对本质矩阵进行奇异值分解(SVD)得到旋转矩阵 R 和平移向量 t 。由

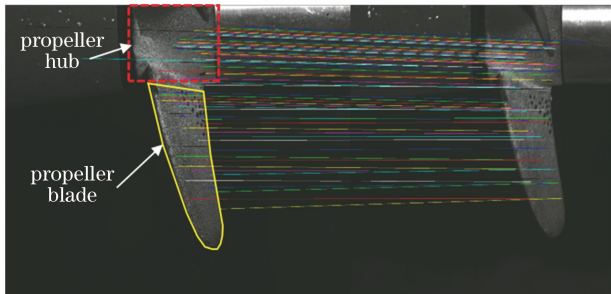


图 2 外参标定中的特征匹配结果
Fig. 2 Feature matching results in external parameter calibration

于 DLT 方法无法恢复出平移向量的绝对尺度信息,因此,还需通过两个相机之间的距离得到像素和物理长度之间的比例因子 s ,最终得到绝对尺度下的平移向量 $T = st$ 。需要注意的是,相机之间的距离指的是两个相机光心之间的距离,可根据镜头物理焦距和成像芯片位置确定每个相机光心的位置。由于人为确定相机光心存在一定的偏差,因此需通过多次确定光心位置并取平均值确认相机之间距离。

2.2 3D-DIC 图像匹配与三维重构

得到成像系统的内参和外参后,3D-DIC 算法通过搜索散斑图像间的立体和时序对应关系,重建被测物体的三维形貌^[22],并将变形前后的三维形貌进行对比,得到三维位移。3D-DIC 测量中,图像匹配和三维重构流程如图 3 所示。其中, (x_n, y_n, z_n) 为 n 时刻目标点的三维坐标。图像匹配中的立体匹配(Stereo matching)和时序跟踪(Temporal tracking)过程都基于 DIC 算法实现,但只在初始时刻的参考图像中进行立体匹配。由于相机间存在明显的透视变形,因此在计算中需用二阶形函数提高匹配精度^[23]。匹配完成后,分别在两个相机拍摄的图像序列中用一阶 DIC 算法跟踪感兴趣点的图像坐标。然后基于三角化(Triangulation)理论得到每个时刻下变形物体的三维形貌^[24]并减去初始三维坐标,从而得到位移场。

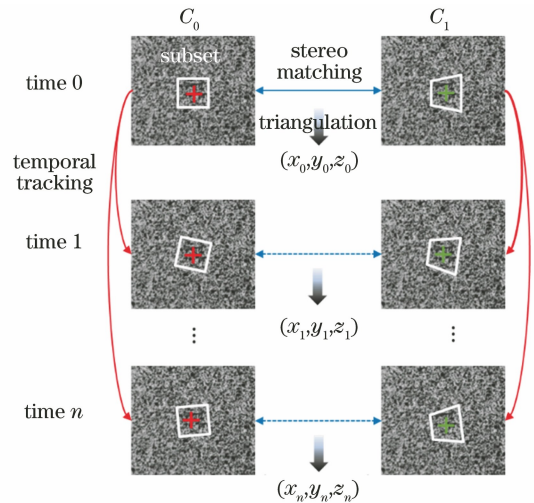


图 3 3D-DIC 测量中的图像匹配和重构
Fig. 3 Image matching and reconstruction in 3D-DIC measurement

2.3 刚体位移消除

由于同步采集控制信号存在一定的延迟,相机观测到的桨叶位移不仅包含了桨叶自身变形产

生的位移,还包含桨毂位置差异导致的刚体位移,如图 4 所示。为了消除刚体位移的影响,首先利用喷涂在桨毂上的散斑特征(如图 2 所示)恢复旋转前后桨毂表面的三维点,然后用迭代最近点(ICP)算法确定变形后物体相对于初始状态的旋转矩阵和平移向量^[25]。最后用该旋转矩阵和平移向量将桨叶旋转后的表面三维点变换到桨叶初始形貌所在的参考坐标系下,进而得到真实的位移数据。

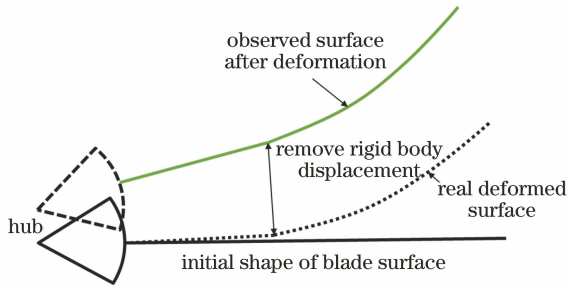


图 4 桨毂旋转引起的刚体位移示意图

Fig. 4 Schematic diagram of rigid body displacement caused by the rotation of the propeller hub

2.4 折射修正

实际测量中,相机通过空泡水筒上的玻璃窗对水中的桨叶进行成像,光线经过空气-玻璃-水三种折射率不同的介质时,发生的折射会对测量结果造成很大的影响^[26]。因此,得到桨叶的三维形貌后,需要修正折射引起的位置偏差。折射修正光路如图 5 所示,其中, n_1 、 n_2 和 n_3 分别为空气、玻璃和水的折射率。为了建立玻璃窗外表面 S_1 和内表面 S_2 的方程,使相机 C_0 的光轴与玻璃窗面垂直,并将该相机坐标系设为世界坐标系,则相机 C_1 的光心坐标为 $\mathbf{T}(T_x, T_y, T_z)$ 。可以发现,玻璃内外表面的法向量 $\mathbf{n} = (0, 0, -1)$ 。如果玻璃窗外表面和内表面到光心的距离分别为 D_1 和 D_2 ,则平面 S_1 和 S_2 的方程分别为 $z - D_1 = 0$ 和 $z - D_2 = 0$ 。

三维重构得到的任意三维点 $\mathbf{P}'(X', Y', Z')$ 与相机 C_1 光心所成直线 l_1 的方程为

$$l_1 = \frac{x - T_x}{\alpha_1} = \frac{y - T_y}{\beta_1} = \frac{z - T_z}{\gamma_1}, \quad (4)$$

式中, $(\alpha_1, \beta_1, \gamma_1)$ 为归一化后入射光线 l_1 的方向向量,由空间坐标 \mathbf{P}' 和相机 C_1 的光心确定。根据直线 l_1 和外平面 S_1 的交点坐标 $p_1(x_1, y_1, z_1)$ 以及方向向量 $(\alpha_1, \beta_1, \gamma_1)$ 和平面 S_1 的法向量 $\mathbf{n} = (0, 0, -1)$ 可知, $\cos \theta_1 = -\gamma_1$, 根据折射定律 $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ 可得到折射角 θ_2 。假设 $(\alpha_2, \beta_2, \gamma_2)$ 为 l_1 经

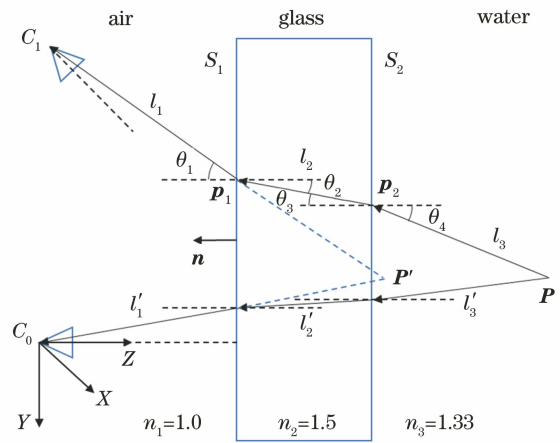


图 5 折射光路示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the refraction light path
外平面 S_1 折射后的光线 l_2 的单位方向向量,则 $\cos \theta_2 = -\gamma_2$, 折射光线的单位方向向量可表示为

$$\begin{cases} \alpha_2 = \frac{n_1}{n_2} \alpha_1 \\ \beta_2 = \frac{n_1}{n_2} \beta_1 \\ \gamma_2 = \sqrt{1 - \frac{n_1^2(1 - \gamma_1^2)}{n_2^2}} \end{cases}, \quad (5)$$

折射光线 l_2 的空间方程可表示为

$$l_2 = \frac{x - x_1}{\alpha_2} = \frac{y - y_1}{\beta_2} = \frac{z - z_1}{\gamma_2}. \quad (6)$$

同理,根据直线 l_2 的空间方程以及平面 S_2 的方程可得到最终折射光线 l_3 的方程。对相机 C_0 进行相同的计算,根据折射面 S_1 和 S_2 、直线 l'_1 和 l'_2 的方程,可得到最终折射光线 l'_3 的方程,联立 l_3 和 l'_3 的方程,可以通过最小二乘法得到修正后桨叶的真实三维坐标。

3 验证实验

为了验证本方法在船用螺旋桨三维位移测量中的可行性和有效性,先对 3D-DIC 测量系统的外参标定和折射修正方法进行了验证,然后对空泡水筒中的螺旋桨原型进行了三维位移测量实验。

3.1 测量系统外参标定验证

实验用两台分辨率为 $2448 \text{ pixel} \times 2050 \text{ pixel}$ 的工业相机(Baumer TXG50, Germany, 镜头焦距为 25 mm)测量安装在二维平移台上十字目标点的三维位移。先用张氏标定法同时对两台相机的内参进行标定,标定时使用角点数为 11×8 , 间距为 8 mm 的棋盘格标定板。然后用视场中覆有散斑的圆柱体图像建立立体对应关系,并根据 DLT 方法

计算相机间的相对外参。同时,根据张氏标定法的标定结果计算一组相对外参用于对比。标定完成后,调节二维移动平台,使目标点分别沿面内 X 方向和离面 Z 方向移动,每次移动 0.5 mm,共移动 5 次。根据确定的相机内参和两组相对外参计算目标点的三维位移量,并与平台移动的真实值进行对比。为了保证张氏标定法和 DLT 方法在外参标定上的可比性,在三维位移计算中采用相同的图像匹配和三维重构方法。

从外参标定结果来看,张氏标定法和 DLT 方法得到的相对旋转角度和平移向量分别为 $(-1.448^\circ,$

$20.263^\circ, 0.671^\circ)$ 、 $(-202.201 \text{ mm}, -11.256 \text{ mm}, 30.073 \text{ mm})$ 和 $(-1.468^\circ, 20.205^\circ, 0.667^\circ)$ 、 $(-203.391 \text{ mm}, -11.920 \text{ mm}, 30.968 \text{ mm})$ 。可以发现,两种算法得到的外参一致,且二者的重投影误差也很接近,分别为 0.092 pixel 和 0.109 pixel。图 6 为测量的目标点三维位移量及其与真实值之间的差异,可以发现,无论是面内 X 方向位移(In-plane displacement)还是面外 Z 方向位移(Out-of-plane displacement),两种方法计算的位移量基本一致,这表明本方法可用于水下船用螺旋桨的三维变形测量。

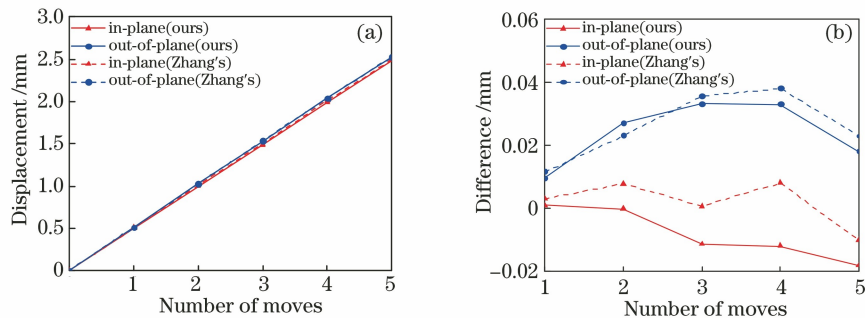


图 6 两种方法计算的位移结果。(a)位移;(b)测量值与真实值的差异

Fig. 6 Displacement results calculated by two methods. (a) Displacement; (b) difference between the measured value and the true value

3.2 折射修正方法的验证

为了验证 2.4 节中折射修正方法的可行性,设计了一组三维形貌重构实验,实验装置如图 7(a)所示。测量目标为放置在矩形玻璃水箱中的圆柱体(直径为 60 mm)。为了使相机 C_0 的光轴垂直于水箱表面,在水箱外表面固定一块平面镜,通过相机观测平面镜中相机镜头中心(镜头中心为通过 Hough 圆变换检测的镜头前表面圆心),当相机镜头中心与图像中心重合时,认为相机 C_0 的光轴垂直于水箱表面。测量得到相机 C_0 光心到水箱外表面的距离 $D_1=509 \text{ mm}$,水箱玻璃壁的厚度为 4 mm。为了验

证折射修正方法的效果,让圆柱一部分位于水面之上,并用两个相机同时拍摄一组圆柱体表面的散斑图像,结果如图 7(b)和图 7(c)所示。

用 2.1 节中的方法对测量系统进行标定,并计算圆柱体的初始三维形貌,然后用折射修正方法消除折射引起的三维重构误差,结果如图 8 所示。可以发现,由于折射的存在,直接重构的三维形貌以水面为界,明显错位成两段,而修正后的图像基本消除了上下两段圆柱面之间的错位情况。分别对修正前后的圆柱面片段进行拟合,得到修正前上、下部分的直径分别为 64.11 mm 和 83.44 mm;修正后上下

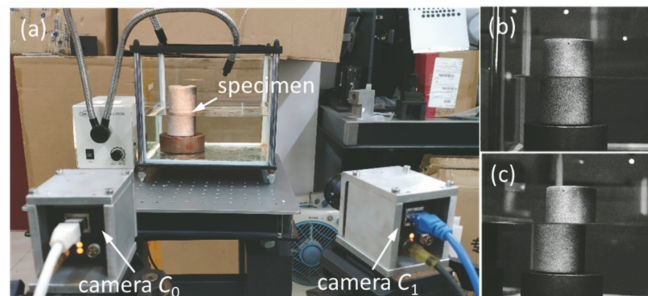


图 7 立体视觉测量系统。(a)实验装置图;(b)相机 C_0 拍摄的图像;(c)相机 C_1 拍摄的图像

Fig. 7 Stereo vision measurement system. (a) Diagram of the experimental setup; (b) image observed by camera C_0 ; (c) image observed by camera C_1

部分的直径分别为 60.18 mm 和 60.87 mm。修正后上下部分直径存在的差异主要源于相机光心到水箱表面距离 D_1 的测量误差。由于圆柱下部分测量受空气-玻璃-水三种介质折射的影响,而上部分圆柱测量仅受空气-玻璃两种介质折射的影响,因此 D_1 的测量误差对下半部分圆柱三维形貌测量的影响更明显。实验结果表明,折射修正方法可有效消除折射对测量结果的影响。

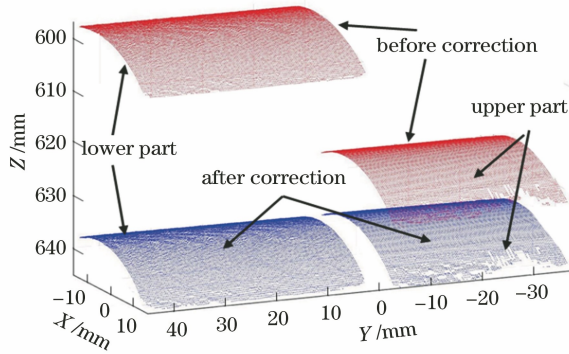


图 8 折射修正前后的圆柱表面三维形貌

Fig. 8 Three-dimensional topographies of the cylindrical surface before and after refraction correction

3.3 螺旋桨动态变形测量

测量船用螺旋桨叶的 3D-DIC 系统如图 9 所示,用两台相机(Baumer TXG50, Germany)采集图像数据,相机的分辨率为 2448 pixel×2050 pixel,镜头焦距为 50 mm。螺旋桨位于空泡水箱中,桨叶上有防水散斑,相机通过空泡水箱上厚度为 100 mm 的玻璃窗(折射率为 1.5)观测待测叶片。安装时使

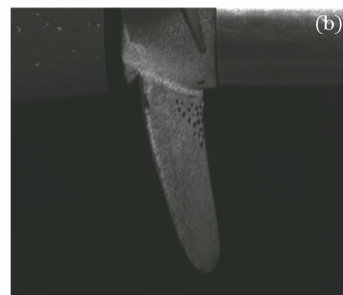
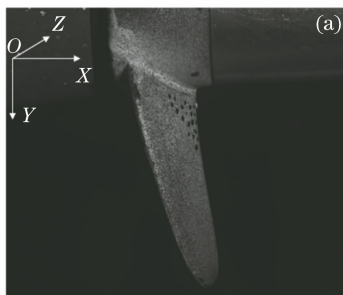


图 10 两个相机拍摄的图像。(a)相机 C_0 ; (b)相机 C_1

Fig. 10 Images observed by two cameras. (a) Camera C_0 ; (b) camera C_1

4 实验结果及讨论

基于拍摄到的图像,用 2.1 节中的内外参分离标定方法对双相机进行标定,得到相机 C_0 和 C_1 的内参和相对外参如表 1 和表 2 所示。

根据 2.2 节中的方法进行时序和立体匹配,并重构不同时刻叶片的三维形貌,再消除折射和刚体

相机 C_0 的光轴垂直于空泡水箱玻璃窗,相机 C_1 位于相机 C_0 上方。闪光灯(Flash)的曝光时间为 100 ns,同步信号发生器(Sync-signal generator)根据螺旋桨的旋转信号同步触发相机和闪光灯,使测量系统能得到清晰的桨叶散斑图像。

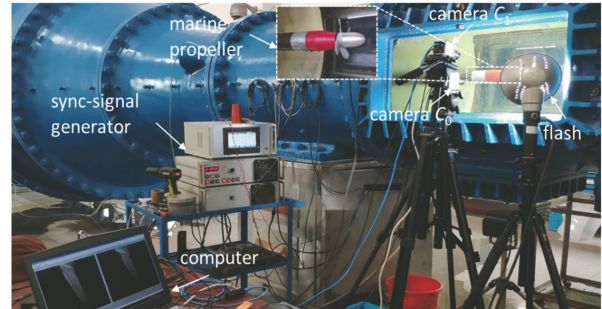


图 9 3D-DIC 测量系统的实物图

Fig. 9 Physical image of the 3D-DIC measurement system

测量系统布置完成后,将空泡水箱内充水,然后加压开始实验,共进行了两组测试。第一组测试中,筒内的水速为 2 m/s,螺旋桨的初始转速为 5 r/s,转速每增加 5 r/s 采集 1 次图像数据,直到转速达到 35 r/s,共采集 7 次图像。第二组测试中,筒内水速为 3 m/s,螺旋桨的初始转速为 5 r/s,转速每增加 5 r/s 采集 1 次图像数据,直到转速达到 35 r/s,共采集 7 次图像。图 10 为相机 C_0 和 C_1 同步拍摄的一对螺旋桨叶片图像,其中, O -XYZ 为相机 C_0 的坐标轴方向,水流方向与 X 轴方向相同。根据采集的图像对双相机进行标定,每组图像均取第一幅图像(螺旋桨转速为 5 r/s)为参考图像进行计算。

位移的影响,最终得到叶片在不同工况下的变形情况。水速为 2 m/s 和 3 m/s 时,桨叶在 X 、 Y 和 Z 方向的位移场随着转速增加的变化情况如图 11 和图 12 所示。可以发现,桨叶的变形量随转速的增加而增大,变形以 X 方向为主,垂直于水流方向(Y 方向和 Z 方向)的变形较小,且变形从叶根到叶梢逐渐变大。原因是转速越大,螺旋桨叶片上不断增加

表 1 相机的内参

Table 1 Internal parameters of the camera

Camera	Intrinsic matrix	Radial distortion
C_0	$\mathbf{A}_l = \begin{bmatrix} 14374.61 & 0 & 1505.04 \\ 0 & 14342.44 & 874.73 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$(-0.4015, -0.5192)$
C_1	$\mathbf{A}_r = \begin{bmatrix} 14369.25 & 0 & 1572.26 \\ 0 & 14345.27 & 843.18 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$(-0.0621, 2.3087)$

表 2 相机之间的外参

Table 2 External parameters between cameras

Rotation vector / ($^\circ$)	Translation / mm	Reprojection error / pixel
$[9.8982, 1.0738, 1.1164]$	$[-15.0712, 101.3678, 79.9839]$	0.14

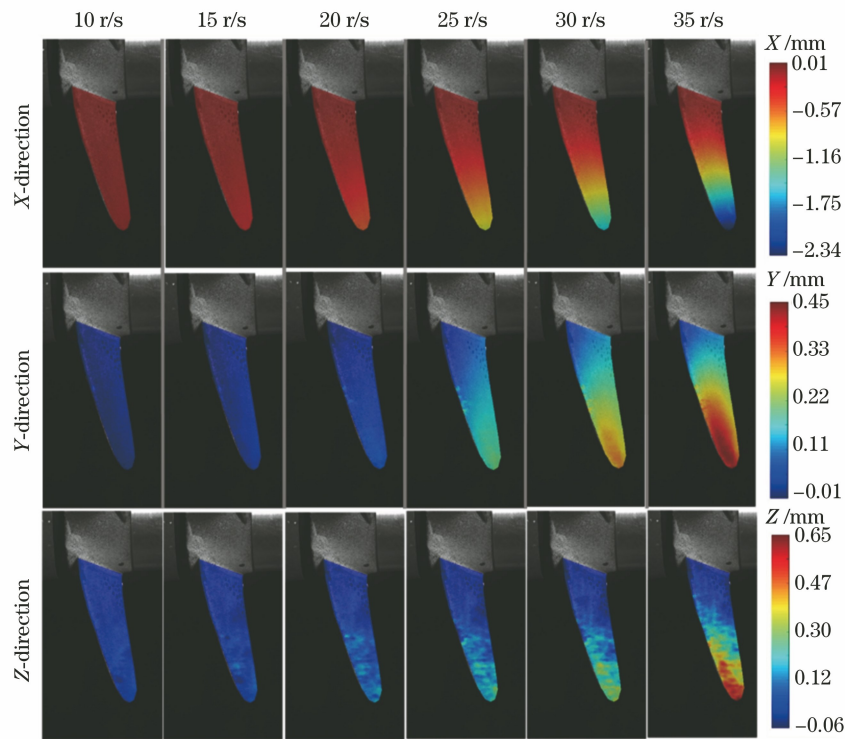


图 11 水速为 2 m/s 时不同方向的位移场

Fig. 11 Displacement fields in different directions when the water velocity is 2 m/s

的推力使桨叶向螺旋桨行进的方向弯曲,且变形在叶梢处达到最大。在转速相同的情况下,水速大的桨叶变形小。原因是转速相同情况下,船速越大,螺旋桨的进速系数越大,螺旋桨的推力与转矩就越小。尽管 Z 方向的位移场与螺旋桨叶片的实际变形趋势吻合,但相比 X 和 Y 方向的位移场不够光滑。原因是相机立体角(绕 X 的转角)较小(9.8982°),导致 Z 方向位移测量的不确定性明显大于其他两个方向。

5 结 论

使用 3D-DIC 系统测量了螺旋桨在不同水速和不同转速下的三维变形情况,首先,在空泡水筒外部搭建了双目图像采集系统,采用螺旋桨旋转信号触发双目相机和闪光灯同步采集图像。然后,用 3D-DIC 系统得到螺旋桨叶片在空泡水筒中工作时的三维位移分布。采用内外参分离标定方式,先用张氏标定法确定相机内参,再通过自标定方法得到相机

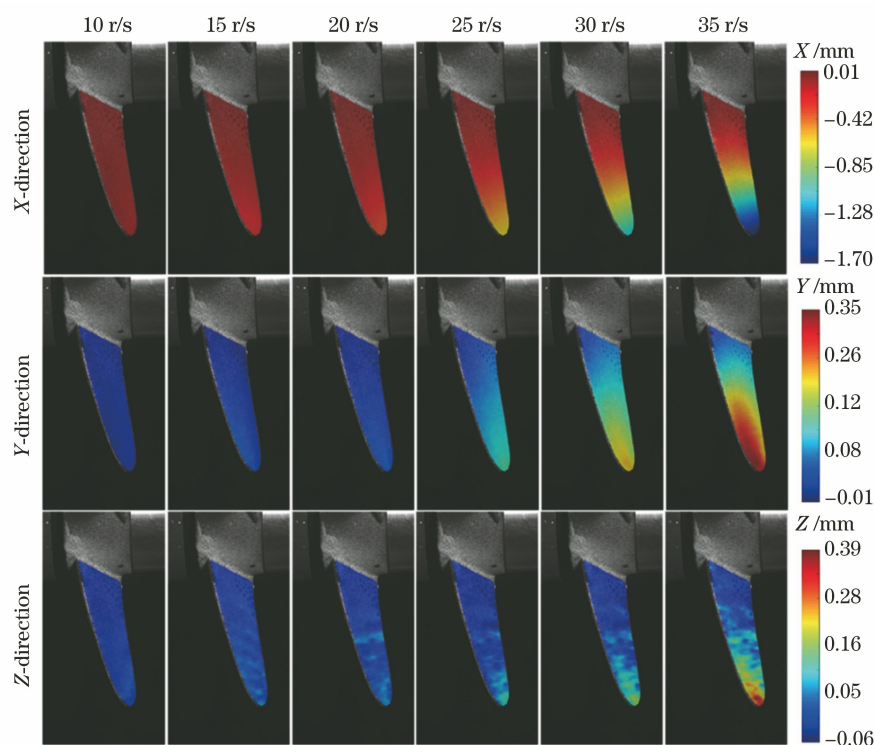


图 12 水速为 3 m/s 时不同方向的位移场

Fig. 12 Displacement fields in different directions when the water velocity is 3 m/s

之间的外参。最后,通过点云配准方法消除桨毂位置偏差引起的刚体位移,同时提出了针对空气-玻璃-水三种介质的折射修正方法,有效消除了折射对测量结果的影响。标定验证实验结果表明,自标定方法的精确度可达到张氏标定法的水平;折射修正实验结果表明,本修正方法可直接通过入射光线和折射面的空间方程消除光线折射引起的测量误差。对螺旋桨叶片的测量结果表明,本方法可以得到接近真实情况的桨叶三维位移分布信息,为船用螺旋桨的三维变形测量提供了一种非接触、全场测量方案。

参 考 文 献

- [1] Zhang X T, Hong Y, Yang F, et al. Propulsive efficiency and structural response of a sandwich composite propeller [J]. *Applied Ocean Research*, 2019, 84: 250-258.
- [2] Li L Y. Research on propeller-induced ship hull vibration and underwater radiated noise[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016: 20-28.
李燎原. 螺旋桨激振力引起的船体结构振动及水下辐射噪声特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016: 20-28.
- [3] Yue Y L, Qi E R, Xu B H, et al. Study of surveying dynamic deformation of rotating propeller in water tunnel[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 1997, 1(2): 33-38.
- 岳亚霖, 祁恩荣, 徐秉汉, 等. 水洞中旋转螺旋桨动态变形测量研究[J]. *船舶力学*, 1997, 1(2): 33-38.
- [4] Dong S, Dai Y T, Dong E L, et al. Three-dimensional reconstruction of dental impression based on multi-camera three-dimensional digital image correlation method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(8): 0812006.
董帅, 戴云彤, 董萼良, 等. 应用多相机三维数字图像相关实现口腔印模三维重构[J]. *光学学报*, 2015, 35(8): 0812006.
- [5] Su Z L, Lu L, Yang F J, et al. Geometry constrained correlation adjustment for stereo reconstruction in 3D optical deformation measurements[J]. *Optics Express*, 2020, 28(8): 12219-12232.
- [6] Zhu F P, Bai P X, Zhang J B, et al. Measurement of true stress-strain curves and evolution of plastic zone of low carbon steel under uniaxial tension using digital image correlation [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 65: 81-88.
- [7] Bing P. Digital image correlation for surface deformation measurement: historical developments, recent advances and future goals [J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29(8): 082001.
- [8] Shan B H, Huo X Y, Liu Y. A stereovision measurement method using epipolar constraint to

- correct digital image correlation matching [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(8): 0804003.
- 单宝华, 霍晓洋, 刘洋. 一种极线约束修正数字图像相关匹配的立体视觉测量方法[J]. 中国激光, 2017, 44(8): 0804003.
- [9] Chen Z N, Shao X X, Wu J L, et al. Full-field deformation measurement of human carotid artery based on water transfer printing speckle patterns[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(3): 0312004.
- 陈振宁, 邵新星, 吴家林, 等. 水转印数字散斑场用于人体颈动脉全场测量[J]. 光学学报, 2017, 37(3): 0312004.
- [10] Zhang S Q, Zhang Y C, Chen M, et al. Characterization of mechanical properties of aluminum cast alloy at elevated temperature [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2018, 39(7): 967-980.
- [11] Jiang R M, Crookes D, Luo N, et al. Live-cell tracking using SIFT features in DIC microscopic videos [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2010, 57(9): 2219-2228.
- [12] Halting P S, Christensen C O, Schmidt J W. Surface rotation correction and strain precision of wide-angle 2D DIC for field use[J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24(4): 04019008.
- [13] Li J R, Xie X, Yang G B, et al. Whole-field thickness strain measurement using multiple camera digital image correlation system [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 90: 19-25.
- [14] Yang D, Su Z L, Zhang S Q, et al. Real-time matching strategy for rotary objects using digital image correlation [J]. Applied Optics, 2020, 59(22): 6648-6657.
- [15] Sicard J, Sirohi J. Measurement of the deformation of an extremely flexible rotor blade using digital image correlation [J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(6): 065203.
- [16] Wu R, Zhang D S, Yu Q F, et al. Health monitoring of wind turbine blades in operation using three-dimensional digital image correlation[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 130: 470-483.
- [17] Poozesh P, Sabato A, Sarrafi A, et al. Multicamera measurement system to evaluate the dynamic response of utility-scale wind turbine blades [J]. Wind Energy, 2020, 23(7): 1619-1639.
- [18] Zhang Z Y. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations[C]//Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision, September 20-27, 1999, Kerkyra, Greece. New York: IEEE Press, 1999: 666-673.
- [19] Li G L, Huang W Y, Liu Q S, et al. Improved Zhang's calibration method and experiments for underwater binocular stereo-vision [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1215006.
- 李光乐, 黄文有, 刘青松, 等. 面向水下双目视觉的改进张氏标定方法及实验[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1215006.
- [20] Hartley R, Zisserman A. Multiple view geometry in computer vision [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [21] Feng W W, Zhang S Q, Liu H B, et al. Unmanned aerial vehicle-aided stereo camera calibration for outdoor applications[J]. Optical Engineering, 2020, 59(1): 014110.
- [22] Ye P, Zhang M, Ma W L, et al. Improved climbing algorithm for digital image correlation displacement measurements [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(2): 021506.
- 叶沛, 张梅, 马万龙, 等. 用于数字图像相关位移测量的一种改进爬山算法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(2): 021506.
- [23] Gao Y, Cheng T, Su Y, et al. High-efficiency and high-accuracy digital image correlation for three-dimensional measurement [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 65: 73-80.
- [24] Hartley R I, Sturm P. Triangulation[J]. Computer Vision and Image Understanding, 1997, 68(2): 146-157.
- [25] Feldmar J, Ayache N, Betting F. 3D-2D projective registration of free-form curves and surfaces [J]. Computer Vision and Image Understanding, 1997, 65(3): 403-424.
- [26] Xie Z X, Yu J S, Chi S K, et al. Underwater calibration and measurement based on non-parallel stereovision[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(9): 0912004.
- 解则晓, 余江姝, 迟书凯, 等. 非平行双目视觉系统水下标定与测量[J]. 光学学报, 2019, 39(9): 0912004.