

基于荧光偏振分像的多翅翼结构三维全场测量

陈振宁^{1*}, 袁锐嘉¹, 邵新星², 孙伟¹, 何小元²¹南京航空航天大学航空学院, 江苏 南京 210016;²东南大学土木工程学院, 江苏 南京 211189

摘要 昆虫飞行过程中, 翅翼会出现扭转、弯曲、卷翘等交叠现象, 各个翅翼间相互遮挡, 导致传统光学测量无法直接分辨其飞行姿态。针对透明膜翅的相互遮挡问题, 提出基于荧光偏振分像的三维数字图像相关方法, 进行多翅翼结构的三维全场变形测量, 解决翅翼遮挡的动态测量问题。根据偏振成像原理, 采用反射镜、偏振镜与分光棱镜组合的分光光路, 实现单个偏振相机测量单色翅翼的三维形貌; 结合荧光散斑的光谱特征, 在各个相互遮挡的翅翼上制作不同散斑荧光, 利用带通滤波片分离各个翅翼上特定光谱的荧光散斑, 实现多个翅翼的独立成像和同步测量。开展等厚度薄板相对面形貌、变形的测量实验, 标定多个相互遮挡面的测量精度。测量昆虫(知了)翅翼交叠的不同形态, 给出了任意相互遮挡翅翼的三维姿态, 验证测量方法的可行性。

关键词 数字散斑; 荧光散斑; 偏振分像; 翅翼交叠; 数字图像相关

中图分类号 O348.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0812003

Three-Dimensional and Full-Field Measurement of Multi-Wing Structure Based on Fluorescence Polarization Imaging

Chen Zhenning^{1*}, Yuan Ruijia¹, Shao Xinxing², Sun Wei¹, He Xiaoyuan²¹College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China;²School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 211189, China

Abstract During insect flight, some overlapping phenomena such as torsion, bending, and warping will appear in the wings, which makes the wings shielded from each other and thus leads to hard discrimination of the flight attitude by traditional optical measurement. To realize the dynamic measurement of mutual occlusion of transparent membranous wings, this paper proposed a three-dimensional (3D) digital image correlation method based on fluorescence polarization imaging to measure the 3D full-field deformation of multi-wing structures. According to the principle of polarization imaging, the 3D morphology of a monochromatic wing can be measured by a single polarization camera in the presence of a splitting optical path integrating mirrors, polarizers and a splitting prism. Depending on the spectral characteristics of fluorescent speckles, different fluorescent speckles were fabricated on different wings that were shielded from each other, and a band-pass filter was used to separate the fluorescent speckles of specific spectra on them, which enabled the independent imaging and synchronous measurement of multiple wings. Firstly, the measurement experiments of the relative surface topography and deformation of the sheet with equal thickness were carried out to calibrate the measurement accuracy of multiple mutually shielded surfaces. Further, the different overlapping forms of insect wings (cicadas) were measured, and the 3D profile of any mutually shielded wings was given to verify the feasibility of the measurement method.

Key words digital speckle; fluorescent speckle; polarized imaging; overlapped wings; digital image correlation

收稿日期: 2021-08-17; 修回日期: 2021-10-26; 录用日期: 2021-11-08

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(11902152, 11902074)

通信作者: *zhenning.chen@nuaa.edu.cn

1 引言

仿昆虫设计的扑翼型微型飞行器因其速度快、航程远、可悬停等优势从众多微型飞行器中脱颖而出,受到航空学家的重视。精确测量知了、蜻蜓等昆虫翅翼结构的运动和变形等动力学特性,对探索其飞行控制、动稳定性和高升力机制具有重要意义,也是进一步设计高性能微型扑翼飞行器的基础^[1-3]。

昆虫飞行过程中,翅翼常常出现扭转、弯曲、卷翘等交叠现象,各个翅翼间相互遮挡,导致传统的非接触光学测量方法无法直接观察并分辨各个翅翼的飞行姿态,这为昆虫翅翼结构的动态测量带来挑战。为了精确测量昆虫的运动和变形,Wang等^[4]用投影栅线方法给出了蜻蜓飞行的轨迹、身体姿态等参数,但其只针对翅翼没有交叠现象的飞行姿态进行重构;Fry等^[5]用三台高速相机测量了果蝇的拍动角、攻角及抬升角随时间变化的关系,其将被测翅翼视为刚性平板,忽略了翅膀柔性膜结构的变形特征;Walker等^[6]用四台高分辨率的摄像机测出了自由悬停飞行食蚜蝇翅膀上有限点(22个)的变形;Chen等^[7]将银片粘贴在蜻蜓翅翼上作为标记点,测试了单只蜻蜓翅翼的固有频率和振型,而附加的银片质量无疑会对蜻蜓固有参数测量产生负面影响。随着研究的深入,人们逐渐意识到发展一种非接触变形测量方法,对相互遮挡柔性膜翅翼进行全场测量具有重要意义。

数字图像相关方法(DIC)通过比较运动和变形前后物体表面的散斑特征来达到追踪目标区域的目的,是近年来光测实验力学领域最为活跃的一种全场变形测量方法,在科学研究和工程应用方面备受关注^[8-12]。三维数字图像相关方法(3D DIC)^[9-12]通常由双相机和光源组成,是一种基于双目立体视觉原理和相关匹配技术的测量方法,能够重构物体的三维形貌、测量三维变形,因此,在昆虫翅翼的全表面变形测量方面具有潜力,同时针对相互遮挡结构的同步测量也存在挑战。目前,代祥俊等^[13]采用电子散斑干涉与数字图像相关方法相互结合,给出透明平板厚度变化的测量结果;Li等^[14]采用四个相机对拉伸构件的前后表面进行同步测量,拟合出试样的厚度应变;Dong等^[15]采用数字图像相关方法结合荧光散斑给出氟塑料空心管外部变形和空心管内部纤维状态的同步监测,而被遮挡的内部纤维变形却没有测量;胡振兴等^[16]采用三维数字图像相关方法结合纳米荧光颗粒先后给出显微结构上、下表面

的三维形貌,在更大视场测量或变形同步测量方面存在局限性。

本文拟采用荧光偏振分像的三维数字图像方法,实现昆虫多翅翼结构的三维全场测量,解决翅翼遮挡的动态测量问题。利用偏振成像原理,采用反射镜、偏振镜与分光棱镜组合的分光光路,实现单个偏振相机测量单色翅翼的三维形貌和变形;结合荧光散斑的光谱特征,在各个相互遮挡的翅翼上制作不同的散斑荧光,并利用带通滤波片分离各个翅翼上特定光谱的荧光散斑,实现各个翅翼的独立成像和同步测量。

2 基于荧光偏振分像的三维数字图像相关方法

2.1 荧光散斑

散斑是数字图像相关方法的信息来源,是数字图像相关方法测量结果一致性和正确性的保障^[17-18]。按照发光形式,散斑也可分为漫反射散斑和主动发光散斑。漫反射散斑依靠纹理本身、黑色涂料和白色涂料的反射率不同,形成较高黑白对比度的散斑图案。自然散斑、一般的人造散斑都以漫反射散斑为主,这也是目前数字图像相关测量所采用的主流散斑。然而,漫反射散斑图案在实际应用中存在一些问题:(1)如果被测物/散斑表面光滑,会出现镜面反射,导致图像灰度分布不均匀或局部区域过曝,一些区域的形貌和变形难以获取;(2)一般情况下,黑色涂料的反射率远小于白色涂料,反射率差异使得散斑图案的对比度不能达到最高的水平,影响了测量的准确性和精度;(3)基于漫反射的黑白涂料形成的散斑通常覆盖试样全表面,使得被测物表面/内部结构在测量过程中难以被观察到,部分力学性能测试将受到限制^[15];(4)当试样外观有颜色、透明度变化时,制作的黑/白散斑,将导致测试时散斑图像的对比度发生改变;(5)在同一被测物上制作散斑的物理尺寸相对单一,较难同时满足多个、不同视场的测量需求^[19-20]。基于上述五种情形,可以采用主动发光(荧光)散斑,以避免黑白涂料漫反射散斑的局限性。

与漫反射散斑制作采用的原料黑白涂料不同,主动发光(荧光)散斑采用的原料为荧光颗粒^[21]、荧光溶液、荧光油墨等,后续统一用荧光液表述。荧光液具有主动发光的性质,即用特定波长(如:365 nm 紫外光)的激发光源照射荧光液,荧光液发出特定波长范围的色光。根据荧光液本身性质,被激发出的

色光可以有很多种,常见为蓝色,也有红色、黄色等其他颜色光。在自然光下,荧光液本身可以是无色透明的,且被激发出的色光通常不受荧光液本身的颜色和透明度影响。选择自身透明的荧光液,结合相应的散斑制作方法,可以制作荧光散斑。

在自然光下,荧光散斑透明不可见,试样表面(透明、纹理等)基本不发生改变;当激发光源照射时,荧光散斑发射出特定波长光线,被相机靶面接收,而荧光散斑未覆盖处基本不反射或发射光线,在成像图片上呈现出黑色。因此,相机采集荧光散斑图对比度相对漫反射散斑对比度较高,且不受背景

色影响。

荧光液被激发出的色光一般都有特定带宽:图 1 给出三种荧光液被紫外光激发出的蓝、黄、红三种带宽范围。如果在相机靶面或镜头前加装特定波长的带通滤波片,可过滤与所发射波长不相干的其他光,如图 1,三种特定的带通滤波片能够分离出蓝、黄、红三色,互不干扰。这也为相互遮挡多翅翼的三维姿态测量提供思路:在各个翅翼上制作不同带宽荧光散斑,且每种散斑的荧光色、带通滤波片一一对应,各个翅翼测量过程中散斑互不干扰,因而,各色散斑可满足对应翅翼三维变形的测量需求。

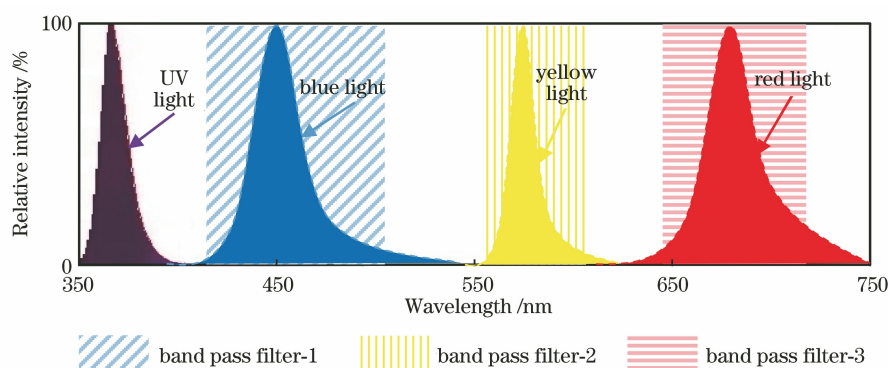


图 1 多光谱荧光散斑

Fig. 1 Multispectral fluorescent speckle

2.2 荧光偏振分像三维数字图像相关测量

2.2.1 偏振相机

光是一种特殊的电磁波,具有波粒二象性,当振动方向与传播方向之间存在不对称时会产生偏振现象。根据偏振成像概念制作的偏振成像系统目前已有分时和同时两种,其中典型的同时偏振成像系统有分振幅、分孔径和分焦平面三种方式。本文采用的是分焦平面同时成像芯片(Sony IMX250MZR, 2/3", 2440 pixel × 2048 pixel),所有的偏振元件均被制作在焦平面上,如图 2:偏振单色成像芯片主要由显微透镜阵列、微偏振片阵列和光电转换阵列组成,其中核心器件微偏振片由 4 个(2 × 2)相邻单像素组成的超像素按规律排列组合而成,每个超像素包含 4 种(0°、45°、90°和 135°)方向的偏振轴,使入射光经过偏振轴落在光电转换阵列上有 4 种偏振角度上的光强信息。

2.2.2 荧光偏振分像三维测量光路

常见的三维数字图像相关测量以两个相机为主,也有结合分光光路、衍射光路等实现单相机的三维数字图像相关测量^[22-24]。图 3(a)利用偏振相机成像原理,结合两个平面镜、两个偏振片、一个分光

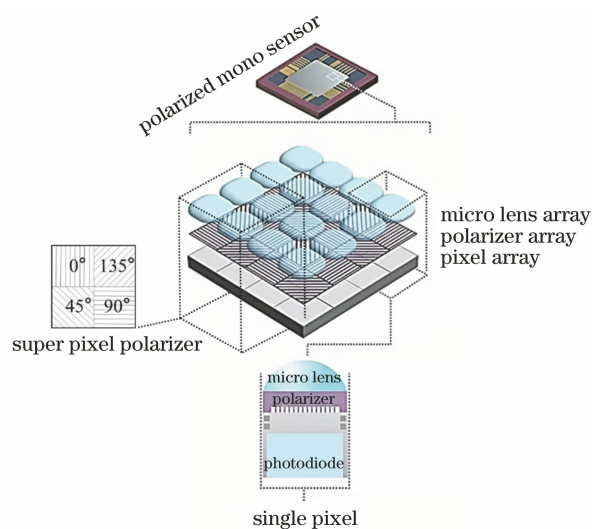


图 2 偏振相机芯片结构图

Fig. 2 Configuration of the polarized mono sensor

棱镜组合成三维测量光路,光路中的偏振片可以旋转,使偏振轴方向分别为 0°和 90°(或者旋转为 45°和 135°),即被测物表面的漫射光经过两条光路上的偏振片和微偏振片阵列后,分别在超像素的 0°和 90°(或者 45°和 135°)光透过率最高,通过分像提取出含有三维被测信息的两幅图,相当于有两个虚拟

相机(记作:虚左、虚右)组成传统的三维数字图像相关测量装置。

针对相互有遮挡的透明物体,若在其表面制作漫反射散斑特征,由于后表面漫反射光线被前表面遮挡,相机只能接收前表面漫反射的光线,重构出前表面单一的三维信息。如果分别在两个相互遮挡面上制作文中 2.1 小节所述荧光散斑,且选定的荧光散斑在前后表面分别被激发出红色、蓝色,按照图 1 的方式分离,当偏振相机镜头前安装与荧光散斑波

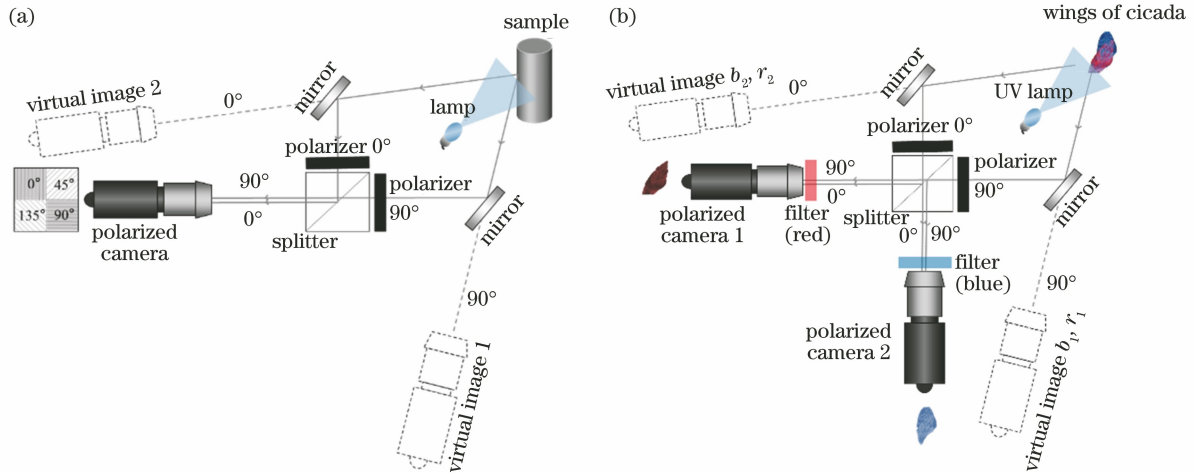


图 3 光路图。(a)偏振分像三维光路图;(b)荧光偏振分像光路图

Fig. 3 Imaging configuration. (a) Polarization imaging configuration; (b) fluorescence polarization imaging configuration

2.2.3 荧光偏振分像三维测量光路的标定

上述荧光偏振分像三维光路[图 3(b)]所示两个偏振相机,分别利用两种偏振轴方向实现各自的虚拟三维数字图像相关系统,为了将两套虚拟单相机三维数字图像系统的测数据融合到同一个世界坐标系下,采取如下的标定方法:利用白光进行照明,将棋盘或圆点标定板放置在试件位置,两个相机同时采集棋盘的位姿,分离与虚拟三维数字图像相关系统对应的偏振通道,即可得到两套虚拟三维数字图像相关系统的标定图片。首先,采用张氏标定法对每套虚拟系统的内、外参进行标定^[25],每套虚拟系统的坐标系以各自虚左相机(虚左红、虚左蓝)的光心为原点而建立。其次,由于两套虚拟相机在白光下看到的是相同标定板,即第一套虚拟系统的虚左相机(虚左红)和第二套虚拟系统的虚左相机(虚左蓝)采集到同一块标定板,因此两个虚左相机(虚左红、虚左蓝)同样可以采用张氏标定法进行标定,以获得虚左蓝相对虚左红的外参,即旋转、平移矩阵。最后,当两套虚拟系统在各自虚左相机建立的坐标系中完成三维重构后,通过虚左蓝相对虚左红

长一一对应的带通滤波片时,前后表面的荧光散斑将分别呈现在两个对应的偏振相机中,如图 3(b)所示。因为前表面和后表面的荧光散斑在紫外灯的照射下主动发光,且散斑本身无色透明,所以前表面的荧光红散斑直接成像到偏振相机 1,后表面荧光蓝散斑穿过透明的前表面成像到偏振相机 2,形成两套单相机三维数字图像相关测量装置,相当于有四个虚拟相机(记作虚左红 r_2 、虚右红 r_1 ,虚左蓝 b_2 、虚右蓝 b_1),实现相互遮挡面的同步测量。

的旋转和平移关系,进行坐标变换,将两套虚拟系统的坐标转换到虚左红相机所在的坐标系,即可实现两套虚拟三维数字图像相关系统的世界坐标融合与统一。

3 实验测量

3.1 可行性验证实验

为了验证荧光偏振分像光路三维测量可行性,选择三种规格(1、2、5 mm)等厚度的透明薄板,对其前后表面的形貌进行同步测量。首先,标定荧光分像光路的参数;其次,在各个板的前表面和后表面分别印制荧光蓝色散斑和荧光红色散斑,将透明薄板固定到手动平移台上,采用三维数字图像相关荧光偏振分像装置记录薄板各个状态下的散斑图:旋转偏振轴方向,使得图 3(b)中被测物表面的漫射光经过两条光路上的偏振片和微偏振片阵列后,分别在两个偏振相机(BFS-U3-51S5P, 2448 pixel \times 2048 pixel)超像素的 0° 和 90° 光透过率最高,通过分像提取两个偏振相机中带通滤光片过滤后的 0° 和 90° 四幅图(1224 pixel \times 1024 pixel)。图 4 给出了分

像后两个偏振相机在 90° 偏振方向的蓝色散斑和红色散斑灰度图。最后,将透明薄板进行水平方向的

面内平移,手动平移步长为 $500\ \mu\text{m}$,采集薄板表面的蓝色散斑和红色散斑灰度图,进行相关计算。

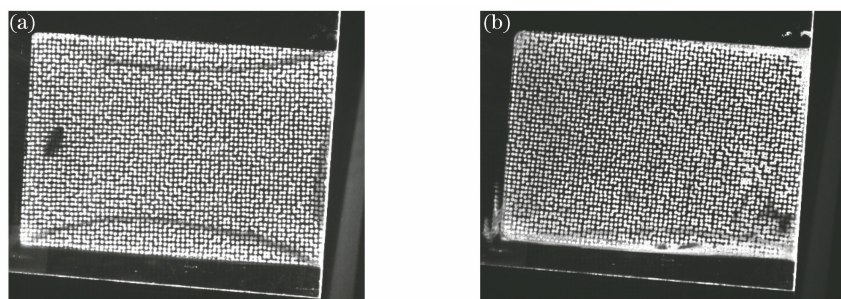


图 4 红蓝散斑分离。(a)分离后 2 mm 板前表面的蓝色散斑灰度图;(b)分离后 2 mm 板后表面的红色散斑灰度图

Fig. 4 Separation of the blue and red speckle pattern. (a) Speckle pattern on the front surface of 2 mm plate after blue filter; (b) speckle pattern on the rear surface of 2 mm plate after red filter

对偏振相机在 0° 和 90° 偏振方向的散斑图进行三维重构,将蓝色、红色散斑的三维重构图转换至同一坐标系下,得到薄板的前后表面形貌图,如图 5 所示。图 5 (a)~(c)分别是 1、2、5 mm 三种规格薄板形貌,图中黑点代表三维数字图像相关实际计算结果,蓝色是根据蓝色散斑重构的三维坐标拟合的平面,红色则是根据红色散斑重构的三维坐标拟合的平面,红蓝两个平面距离可以根据平面方程近似给出,分别为 1.04、2.03 和 4.86 mm。薄板的厚度用两个平面间的距离近似计算,则通过荧光偏振分像三维数字图像相关方法测量出的薄板厚度近似为 1.04、2.03 和 4.86 mm,与薄板真实厚度之间的差异主要是因为测量中未考虑光在薄板中的折射率问题^[26]而这样折射率问题在极薄翅翼交叠形态测量中几乎可以忽略。

进一步地,对薄板前、后表面的水平位移与预加面内位移关系进行线性拟合,结果如图 6 所示。图中计算点的横坐标 x 表示手动施加的位移 (mm),纵坐标 y 表示三维数字图像相关计算所得的水平位移平均值 (mm)。如果不考虑手动加载和位移计算的误差,理想情况下图 6 中的数据应满足直线方程 $y=x$ 。将计算出的水平位移平均值进行线性拟合,且拟合的线性方程为 $y=a+bx$,线性拟合的斜率 b 、截断误差 a 及其对应的标准差由图 6 中的表格所示。线性拟合方程的斜率与理想 $b=1$ 之间的平均误差为 1.1%,截断误差与理想值 $a=0$ 之间的平均误差为 2.4%。结果表明,无论是前表面的蓝色散斑、还是后表面的红色散斑,计算位移与施加位移均具有较好的吻合度。

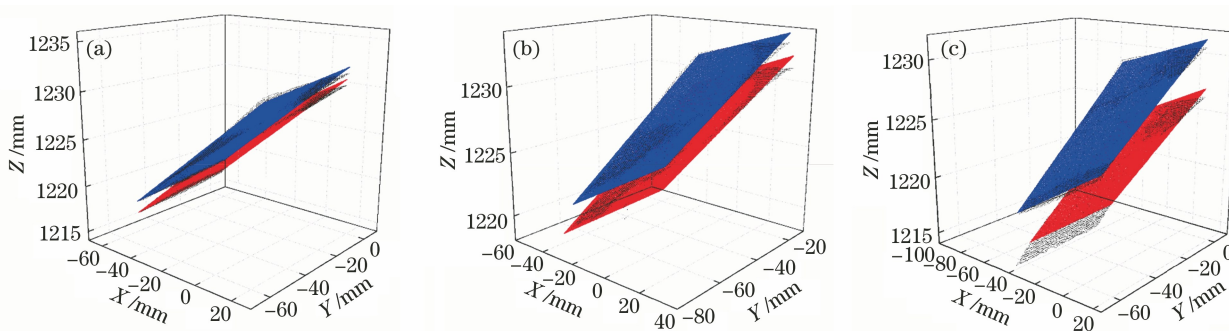


图 5 薄板形貌。(a) 1 mm 板的前后表面三维形貌;(b) 2 mm 板的前后表面三维形貌;(c) 5 mm 板的前后表面三维形貌

Fig. 5 Plate profile. (a) Front and rear surfaces of 1 mm plate; (b) front and rear surface of 2 mm plate; (c) front and rear surface of 5 mm surface

3.2 昆虫翅翼交叠姿态测量

昆虫(比如知了、果蝇等)飞行时翅翼出现扭转、弯曲、卷翘等交叠现象,导致各个翅翼相互遮挡。同时,翅膀基本全透明,而翅脉特征非常少。因此,采

用三维数字图像相关方法对翅翼进行测量时,不可避免地需要制作散斑,以更好地表征翅翼姿态。若采用常规的黑白涂料制作漫反射散斑,则外侧翅翼的散斑会遮挡交叠翅翼的散斑特征,而被遮挡翅翼

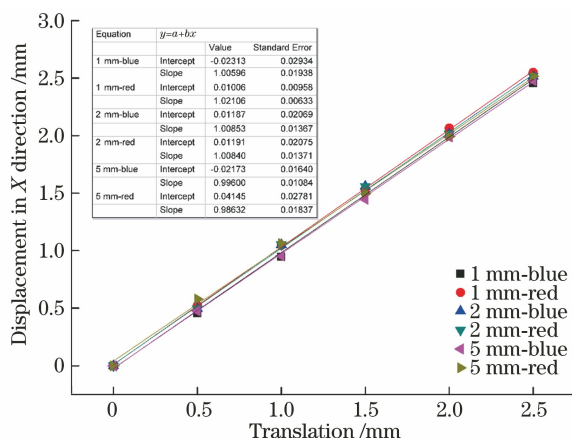


图 6 薄板各表面水平位移与预加面内位移线性关系图
Fig. 6 Relationship between the performed and calculated displacements in horizontal X direction

的散斑也会穿过外侧翅翼的透明区域,使得内外侧翅翼相互交叠,导致三维形貌、变形等物理量测量失败。采用荧光偏振分像三维测量光路,可以有效地避免上述问题的产生。

以知了的两个相互遮挡翅翼的姿态测量为例。首先,在两个翅翼上分别制作不同的荧光散斑,荧光散斑在自然光下均透明无色,而在 365 nm 紫外灯的激发下,会分别发出蓝色、红色两种带宽的色光。图 7(a)为荧光红、蓝相互交叠翅翼未分离前的真实图像。接着,将制作好散斑的翅翼放置在如图 7(b)所示的测量装置上,该装置由两个灰度偏振相机、红色带通滤光片、蓝色带通滤光片、两个平面镜、两个偏振片(0°和90°)、一个分光棱镜组成两套虚拟的三

维数字图像相关测量系统:偏振相机 1 的所有超像素在 0°和 90°方向的成像构成一套虚拟的三维数字图像相关测量装置,且该套装置会过滤掉蓝色光谱,只允许翅翼上荧光红散斑通过带通滤波片,成像到偏振相机 1 中;偏振相机 2 的所有超像素在 0°和 90°方向的成像构成另一套虚拟的三维数字图像相关测量装置,且该套装置会过滤掉红色光谱,只允许翅翼上荧光蓝散斑通过带通滤波片,成像到偏振相机 2 中。因此,相互遮挡的各个翅翼能够在偏振相机中独立成像,互不影响。最后,分离相机偏振轴方向为 0°和 90°的图像,作为三维数字图像相关测量的虚拟图像,进行对应翅翼的三维形貌重构。

为了验证荧光偏振分像装置测量昆虫翅翼交叠姿态的可行性,随机固定翅翼的相对位置,以模拟知了飞行时翅翼的任意随机状态。变换两个翅翼的相对位置并将其重新固定到图 7(b)所示测量位置,进行多组交叠翅翼的三维姿态测量,并将翅翼的三维坐标转换到同一个世界坐标系下,测量结果如图 8 所示;红色、蓝色圆点位置用荧光红、荧光蓝翅翼的计算点三维坐标表示,根据红色、蓝色三维坐标点分别拟合出翅翼形貌曲面,并以彩色云图表示,其中云图的颜色代表坐标值 Z 的大小。由于翅翼姿态已被重构到同一世界坐标系中,因而图 8 所示的红色、蓝色翅翼相互交叠的姿态即为真实姿态。由于翅翼中除了透明膜,仍然有少许翅脉支撑翅翼,会遮挡部分的光线,导致计算点的丢失[图 8(e)]。总体来说,采用荧光偏振分像的方法能够实现翅翼任意交叠姿态的测量。

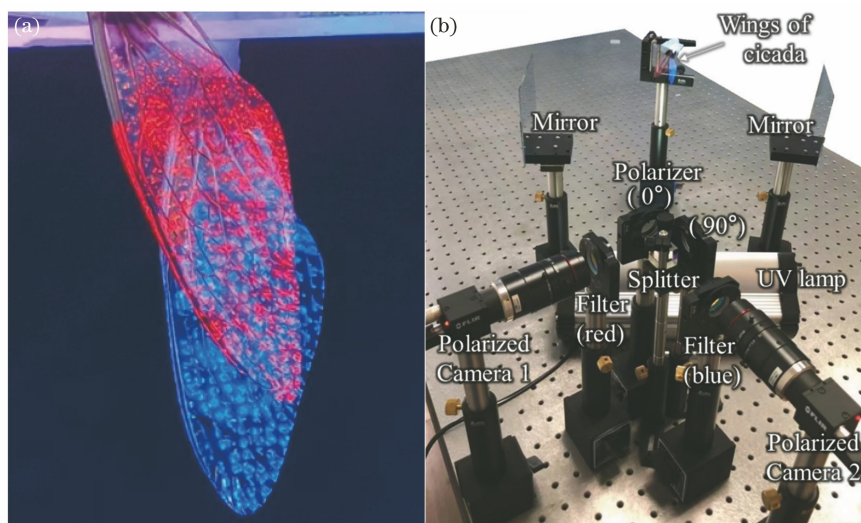


图 7 实验对象与测试系统。(a) 365 nm 紫外光(UV 光)激发下的红蓝相互交叠翅翼;(b)知了翅翼相互遮挡测量的实验装置图

Fig. 7 Samples and setup. (a) Wings with blue or red speckle pattern under 365 nm UV light;

(b) setup to measure the overlapped wings of cicada

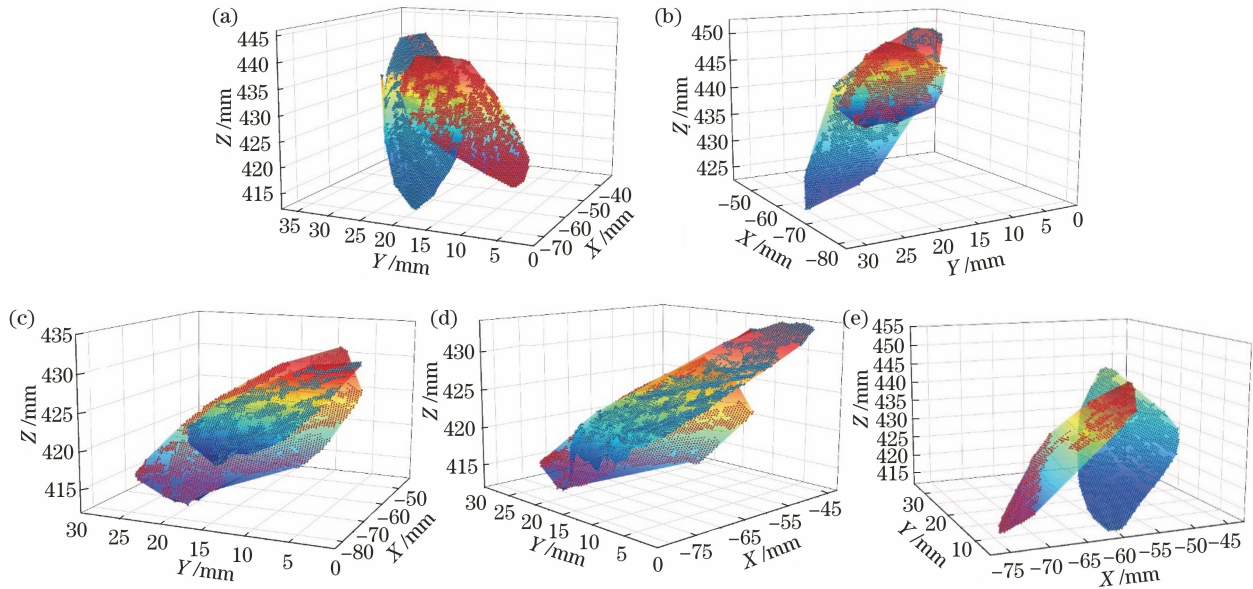


图 8 不同交叠情况下的翅翼姿态重构图。(a)姿态 1;(b)姿态 2;(c)姿态 3;(d)姿态 4;(e)姿态 5

Fig. 8 Reconstructed profiles of the overlapped wing structures. (a) Overlapped posture 1; (b) overlapped posture 2; (c) overlapped posture 3; (d) overlapped posture 4; (e) overlapped posture 5

4 结论与讨论

针对透明膜翅的相互遮挡问题,本文提出一种基于荧光偏振分像的三维数字图像相关方法,为多个相互遮挡翅翼的三维姿态的同步测量提供有效方案。该方法的实现取决于两个关键因素:一个是多带宽荧光散斑的制作,另一个是偏振分像的利用。文中图 3(b)的荧光偏振分像光路恰好解决了该问题。在可行性实验验证上,开展等厚度薄板相对面形貌、变形的测量实验,标定多个相互遮挡面的测量精度。由于昆虫翅翼极薄,常常只有 $10\ \mu\text{m}$ 左右的厚度,因而在薄板相对面形貌测量的验证性实验中,未考虑到折射率的影响,使得测量的厚度与实际稍有差异,而在刚体平移实现中,计算位移与施加位移吻合较好。进一步地,测量昆虫(知了)翅翼交叠的不同形态,给出了任意相互遮挡翅翼的三维姿态,验证测量方法的可行性。

1) 荧光偏振三维数字图像相关测量光路,所用一个分光棱镜、两个偏振片可以由一个偏振分光棱镜替代。替代后的光路所用光学器件会明显减少,但是缺点是偏振方向无法调节,只能成像到超像素的 0° 和 90° 单像素上,无法成像到超像素的 45° 和 135° 偏振方向上。

2) 荧光偏振三维数字图像相关测量光路以灰度偏振成像芯片为例,具有较高的信噪比和分辨率。可以采用单个彩色偏振成像芯片替代图 3(a)中灰度偏

振相机,相机内置彩色滤光片可进行散斑颜色(翅翼)分离,同样可以实现与图 3(b)类似的测量效果^[27],缺点是分光分色后图像分辨率会有明显的降低。

3) 利用偏振相机内置的微偏振片阵列,使入射光经过偏振轴落在光电转换阵列上有 4 种偏振角度上的光强。本文未充分利用每个偏振超像素 4 种 (0° 、 45° 、 90° 和 135°) 方向的偏振轴信息,只利用了其中两个偏振方向 (0° 、 90° 或 45° 、 135°)。充分利用偏振相机的分辨率解决荧光偏振分像的多翅翼结构三维全场测量是值得期待的。

参 考 文 献

- [1] Wang S Z, Zhang X, He G W, et al. Lift enhancement by bats' dynamically changing wingspan [J]. *Journal of the Royal Society, Interface*, 2015, 12(113): 20150821.
- [2] Sun M. Aerodynamics of animal flight [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2018, 36(1): 8, 122-128. 孙茂. 动物飞行的空气动力学 [J]. *空气动力学学报*, 2018, 36(1): 8, 122-128.
- [3] Ang H S. Design principles and strategies of micro air vehicle [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2016, 37(1): 69-80. 昂海松. 微型飞行器的设计原则和策略 [J]. *航空学报*, 2016, 37(1): 69-80.
- [4] Wang H, Zeng L, Liu H, et al. Measuring wing kinematics, flight trajectory and body attitude during forward flight and turning maneuvers in dragonflies

- [J]. *The Journal of Experimental Biology*, 2003, 206(4): 745-757.
- [5] Fry S N, Sayaman R, Dickinson M H. The aerodynamics of hovering flight in *Drosophila* [J]. *Journal of Experimental Biology*, 2005, 208(12): 2303-2318.
- [6] Walker S M, Thomas A L R, Taylor G K. Deformable wing kinematics in free-flying hoverflies [J]. *Journal of the Royal Society Interface*, 2010, 7(42): 131-142.
- [7] Chen J S, Chen J Y, Chou Y F. On the natural frequencies and mode shapes of dragonfly wings [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2008, 313(3/4/5): 643-654.
- [8] Chu T C, Ranson W F, Sutton M A. Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics [J]. *Experimental Mechanics*, 1985, 25(3): 232-244.
- [9] Pan B, Xie H M, Li Y J. Three-dimensional digital image correlation method for shape and deformation measurement of an object surface [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2007, 22(6): 556-567.
潘兵, 谢惠民, 李艳杰. 用于物体表面形貌和变形测量的三维数字图像相关方法 [J]. *实验力学*, 2007, 22(6): 556-567.
- [10] Su Y, Zhang Q C, Wu X P. Progress in digital image correlation method [J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2018, 48(9): 29-53.
苏勇, 张青川, 伍小平. 数字图像相关技术的一些进展 [J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2018, 48(9): 29-53.
- [11] Sun W, He X Y, Zheng X. Three-dimensional rigid body displacement measurement based on digital image correlation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(5): 894-901.
孙伟, 何小元, 郑翔. 基于数字图像相关的三维刚体位移测量方法 [J]. *光学学报*, 2008, 28(5): 894-901.
- [12] Shao X X, Dai Y T, He X Y, et al. Real-time digital image correlation for quasi-static test in civil engineering [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(10): 1012003.
邵新星, 戴云彤, 何小元, 等. 实时数字图像相关用于土木准静态实验测量 [J]. *光学学报*, 2015, 35(10): 1012003.
- [13] Dai X J, Yun H, Pu Q. Measuring thickness change of transparent plate by electronic speckle pattern interferometry and digital image correlation [J]. *Optics Communications*, 2010, 283(18): 3481-3486.
- [14] 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.
- [15] Dong B, Li C Z, Pan B. Fluorescent digital image correlation applied for macroscale deformation measurement [J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 117(4): 044101.
- [16] Hu Z X, Xu T G, Luo H Y, et al. Measurement of thickness and profile of a transparent material using fluorescent stereo microscopy [J]. *Optics Express*, 2016, 24(26): 29822-29829.
- [17] 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.
- [18] Su Y, Gao Z R, Fang Z, et al. Theoretical analysis on performance of digital speckle pattern: uniqueness, accuracy, precision, and spatial resolution [J]. *Optics Express*, 2019, 27(16): 22439-22474.
- [19] Chen Z N, Shao X X, Sun W, et al. Optimization of multiscale digital speckle patterns for multiscale deformation measurement using stereo-digital image correlation [J]. *Applied Optics*, 2021, 60(16): 4680-4689.
- [20] Fouque R, Bouclier R, Passieux J C, et al. Fractal pattern for multiscale digital image correlation [J]. *Experimental Mechanics*, 2021, 61(3): 483-497.
- [21] Berfield T, Patel J, Shimmin R, et al. Fluorescent image correlation for nanoscale deformation measurements [J]. *Small*, 2006, 2(5): 631-635.
- [22] Li M, Su Z L, Zhang D S. Methods for digital image correlation measurement with camera shake correction based on affine transformation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(9): 0912002.
李明, 苏志龙, 张东升. 基于仿射变换矫正相机抖动的数字图像相关测量方法 [J]. *光学学报*, 2021, 41(9): 0912002.
- [23] Wang X B, Dong W, Yang M, et al. Inhomogeneous strain measurement based on least absolute deviation fitting for digital image correlation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(3): 0312001.
王学滨, 董伟, 杨梅, 等. 基于最小一乘拟合的非均匀应变的数字图像相关测量 [J]. *光学学报*, 2020, 40(3): 0312001.
- [24] Du J X, Zhao J Q, Wang H T, et al. Regularized global digital image correlation method for crack tip deformation field measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(11): 1112001.

- 杜鉴昕, 赵加清, 王海涛, 等. 一种针对裂尖变形场测量的正则化全局 DIC 方法 [J]. 光学学报, 2020, 40(11): 1112001.
- [25] 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.
- [26] Pan J Y, Zhang S Q, Su Z L, et al. Measuring three-dimensional deformation of underwater propellers based on digital image correlation [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(12): 1212001.
- 潘济宇, 张水强, 苏志龙, 等. 基于数字图像相关的水下螺旋桨三维变形测量 [J]. 光学学报, 2021, 41(12): 1212001.
- [27] Chen Z N, Xu Y N, Tang X Q, et al. Dual stereo-digital image correlation system for simultaneous measurement of overlapped wings with a polarization RGB camera and fluorescent speckle patterns [J]. Optics Express, 2022, 30(3): 3345-3357.