

文章编号: 0258-7025(2001)05-0476-05

投影梳状条纹插值法测量蜻蜓的翅膀变形^{*}

宋德强 王浩 曾理江 殷纯永

(清华大学精密仪器系精密测试技术与仪器国家重点实验室 北京 100084)

提要 提出一种使用梳状条纹插值法测量昆虫运动的方法,并实现了对扇动中的蜻蜓翅膀的弓形变形和扭转变形的测量。结果表明在扇翅运动中蜻蜓翅膀产生较大的弹性变形。这种测量可以帮助流体力学建立更为精确的翅膀模型,从而对蜻蜓飞行中的升力来源给出更为精确、科学的解释。

关键词 投影条纹法,昆虫,蜻蜓,变形,攻角,梳状条纹

中图分类号 TN 247, TN 249 **文献标识码** A

Measuring Deformation of Dragonfly Wing Using Projected Comb-fringe

SONG De-qiang WANG Hao ZENG Li-jiang YIN Chun-yong

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments,
Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract In this paper, a novel method for measuring the deformation of dragonfly wing based on comb-fringe projection is introduced as well as relative experiments. The result shows that there is concernful elastic deformation on the flapping wing.

Key words fringe pattern projection, insect, dragonfly, deformation, attack angle, comb-fringe

1 引 言

在昆虫的飞行特性中,一个重要的研究参数是蜻蜓翅膀在气流中的扭转变形。近年来已经提出若干种测量昆虫翅膀扭转角的方法^[1~3]。这些方法都得到了一些比较好的结果,尤其是使用高速摄影然后进行图像处理的方法^[2,3],可以很方便地用于测量自由飞行的昆虫。在上面这些方法中,都假设翅膀是不会发生形变的刚体平板。稍有例外的是一种称作条杆法(Strips)的图像处理算法^[4],它没有假设翅膀完全是刚体,而是假设翅膀沿翅伸方向由许多刚体杆组成,这些刚体杆可以绕翅膀纵轴(过翅根沿翅伸方向的轴)自由旋转,也即刚体杆之间可以有相对扭动,以此突破翅膀是完全刚体板的假设。

然而在蜻蜓的运动测量中,我们发现这种近似刚体的假设仍然不尽合理,因为飞行中的翅膀常常产生比较显著的变形,而且这种变形在计算扭转角

和在进行计算流体力学分析时是不可以忽略的。因此如果能在测量翅膀扭转角的同时,测量出翅膀的变形,这将有助于进一步提高昆虫运动测量的精度,为进一步揭示昆虫飞行奥秘提出更为详尽的信息。

昆虫运动测量的特点之一是必须进行非接触测量。而在非接触变形测量方法中,一种典型的方法便是投影条纹法。投影条纹法的具体实现有多种,其中基于多步移相的测相法可以使投影条纹法达到相当高的精度^[5]。然而在蜻蜓翅膀运动的测量实验中,通常的较高精度的移相测相投影条纹法很难使用。一个原因是,蜻蜓是生物活体,并且它的扇翅很快,因此没有足够的时间来完成对它的移相测量;另一个原因是蜻蜓的翅膀透明且表面较光滑,在小块区域内呈近似镜面反射特性,而且各小块区域的平面方向不同,因此在宏观上表现为散射率很不均匀。这种散射的不均匀相当于在投影到翅膀上的正弦条纹(光强呈正弦函数变化的光栅条纹)之上另外附加了一个相位变化,因此大大破坏了本来携带着三维深度信息的相位函数,最终使基于相位测量的深度测量方法得不到正确的结果。因此,为了测量蜻蜓在扇翅过程中的翅膀变形,我们尝试改进测相投影

^{*} 国家自然科学基金(59875043)和国家杰出青年科学基金(59925514)资助项目。

条纹法。

2 梳状投影条纹法

考虑到以上种种原因,我们并不假设昆虫翅膀是不能变形的刚体或只能在某些方向变形的半刚体,而是认为蜻蜓翅膀除前缘(相当于翅膀运动的主梁)外都是可以发生弹性形变的弹性板,在扇动中可能由于肌肉控制或受力发生某些弹性变形,而这些变形在测量前是完全不知道的。实验中使用能产生精细梳状条纹的光栅投影激光器,这样在光强集中的梳状条纹所在处可以得到较为准确的结果,避免了使用正弦条纹所造成的空间分辨率降低。使用梳状条纹的代价是失去了宝贵的相位信息,难以借用已经比较成熟的测相法,但是这样使得测量蜻蜓这样的透明翅膀的变形成为可能。在后续的数据处理过程中,使用插值法可以得到梳状条纹间隙处的数据,从而求出对翅膀上感兴趣部分的扇动变形和扭转角。

为了测量蜻蜓扇翅时翅膀的变形,蜻蜓被固定在一根细的钢杆上(如图 1(a)所示)。身体中心在 CCD 摄像机的视场中央,身体平面与水平面近似平行,在身体不动的条件下,可以作自由扇翅运动。FPP(Fringe Pattern Projector,本实验中使用光栅梳状条纹投影激光器)被固定在与 x 轴成 90° ,与 y 轴成 45° ,与 z 轴成 45° 的位置,即与水平面成约 45° 角的位置上。CCD 摄像机在高度为 800 mm 左右的上方。调整蜻蜓,FPP和 CCD 摄像机三者之间的位置

关系使翅膀不会超出到拍摄视场之外且投影条纹的零级打在蜻蜓的躯体中心附近。蜻蜓的扇翅幅度一般在 $\pm 30^\circ$ 左右,因此,为了使条纹在整个扇翅周期中都能以斜角投射到翅膀上,而不与翅膀面平行,将 FPP 以与水平面成近似 45° 角放置。

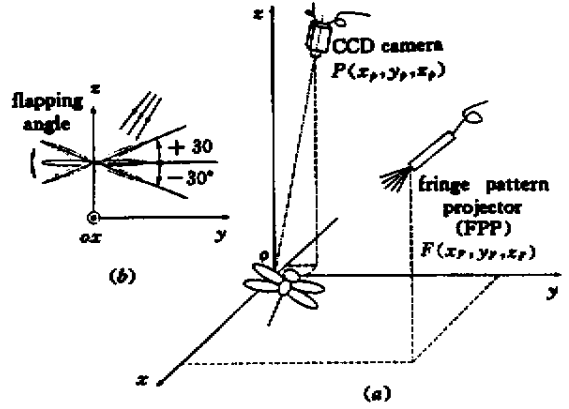


图 1 测量装置图
Fig.1 System configuration

在调整好蜻蜓,FPP和 CCD 摄像机三者之间的关系之后,对蜻蜓的扇翅运动进行拍摄。并将图像系列存储,以备处理。然后标定出系统参数,包括 CCD 摄像机的位置 $P(x_p, y_p, z_p)$ 和 FPP 的位置 $F(x_f, y_f, z_f)$, CCD 镜头中心到 CCD 像面的距离,以及 FPP 投射的各个光切面的空间方向 \vec{a}_i 。标定结果如表 1 所示。

表 1 系统的标定结果

Table 1 Calibrated result of the system

(The normal directions of the fringes have totally 19 columns, from 9 to +9, there is only a part in the following table)

	The coordinate/mm		The normal directions of the fringes					
	CCD	FPP	-5	-4	-3	-2	-1	0
X	-13.0	164.0	-0.098	-0.106	-0.115	-0.120	-0.126	-0.133
Y	45.7	175.0	0.772	0.784	0.797	0.808	0.819	0.830
Z	820.4	217.7	-0.628	-0.611	-0.593	-0.577	-0.560	-0.541

$S = 98452$, Unit: pixel.

整个实验在恒温室进行,温度 23°C ,湿度 16%。蜻蜓从户外当天捕捉(八月)。光栅梳状条纹投影激光器为功率 15 mW 的半导体激光器,室内无其他可见光源。摄像机镜头焦距为 50 mm,曝光时间为 $1/4000$ s(为保证拍摄的蜻蜓扇翅图像清晰)。

为了后续的数据处理,在得到光学系统的位置参数后将坐标系进行变换,目的是以通过少许附加的运算得到较为清晰的物理概念。测量时以工作台

为基准建立坐标系,而图像处理时以图像为基准建立坐标系,两个坐标系中的坐标可以通过坐标转换矩阵实现相互转换。

3 计算任意一条条纹上的点的空间坐标

由图像可以得到翅膀上条纹级次为 n (即第 n 个片光平面)的条纹上的点 W 的图像坐标 $W(X_W,$

Y_W (如图2所示),即所求点 W 便是线段 $W'O$ 的延长线与第 n 个片光平面的交点。根据图中的几何关系,有

$$\begin{cases} \frac{X_W'}{S} = \frac{-X_W}{-Z_W} \\ \frac{Y_W'}{S} = \frac{-Y_W}{-Z_W} \end{cases} \quad (1)$$

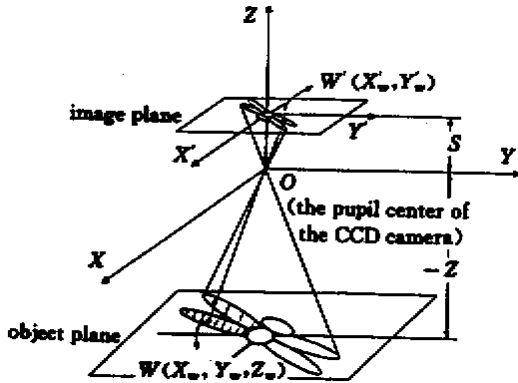


图2 CCD 成像原理图
Fig.2 CCD imaging principle

另外知道 W 点在第 n 个光平面上,故 W 应满足该平面方程,如果使用向量式的平面方程,即

$$(\vec{r}_W - \vec{r}_F) \cdot \vec{a}_n = 0 \quad (2)$$

\vec{r}_W 为 W 点的空间矢量,即 (X_W, Y_W, Z_W) , \vec{r}_F 为 F 点的空间向量, \vec{a}_n 为平面第 n 级光平面的法线方向。在方程(1)和(2)中, $\vec{r}_F, \vec{a}_n, X_W', Y_W', S$ 均为已知数,未知数为 (X_W, Y_W, Z_W) ,因此可以解出 W 点的空间坐标 (X_W, Y_W, Z_W)

$$\begin{cases} Z_W = \frac{\vec{r}_F \cdot \vec{a}_n}{\begin{bmatrix} -X_W'/S \\ -Y_W'/S \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \vec{a}_n} \\ X_W = \frac{X_W'}{S}(-Z_W) \\ Y_W = \frac{Y_W'}{S}(-Z_W) \end{cases} \quad (3)$$

通过此法求得所有条纹上的点的空间坐标。各点的条纹级次的确定,是以打在蜻蜓躯体上的为零级,左翅上依次为 $-1, -2, -3, \dots$ 级,右翅上分别 $+1, +2, +3, \dots$ 级。

此方法的不确定度可以通过测量已知形状的物体得到验证。验证的结果表明:空间距离为 30 mm 的两个空间点之间的相对位置误差在 1 mm 以下。即空间相对位置误差在 3.3% 以下。

4 插值法计算翅膀各纵长处的变形

在被测翅膀的每根条纹上取若干点(一般取 20 个点左右),计算各点的空间坐标,这样可以得到翅膀的横向弧形轮廓(如图3(a)中弧线 A_1B_1 所示,横向是指与翅伸方向垂直的方向),然后将条纹的首尾点,即图中的 A_1 和 B_1 相连且 N 等分(本实验中 N 取 6),得到 N 等分点 D_1, D_2, D_3 和 D_4 并通过各均分点作线段 A_1B_1 的垂面,交弧形轮廓 A_1B_1 于 $N-1$ 个点(即图中的 E_1, E_2, E_3 和 E_4),然后纵向连接各横向条纹的等分点(纵向是指平行于翅伸方向),将形成翅膀的网状轮廓,如图3(a)所示。注意纵向连接的是弧形轮廓的等分点,而不是横向弦的等分点。

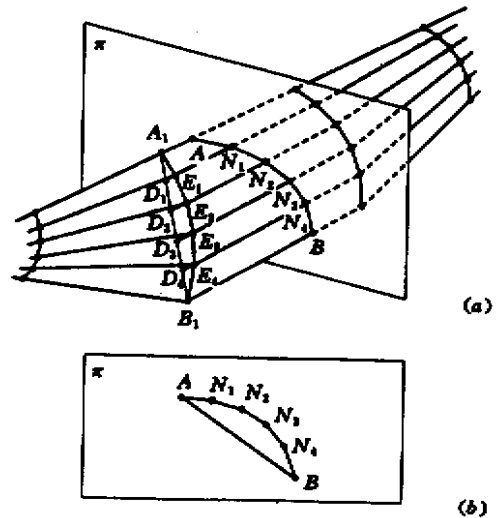


图3 三维重构得到的弓形变形
Fig.3 3D reconstructed camber deformation

蜻蜓作扇翅运动时,其翅膀前缘的变形很小。因此在计算翅膀各纵长处的变形时,可以以前缘作为纵长的测量对象。如果想知道翅长 50% 处出现的翅膀变形,则先取前缘长的 50% 处(如图3中的 A 点),并过此点作垂直于前缘的平面,并设平面与几条纵向轮廓线相交于 N_1, N_2, N_3, N_4 ,与后缘相交于 B 点。通过空间坐标计算,可以得到 N_1, N_2, N_3, N_4, B 点的坐标。则在平面内观测的弧形 $AN_1N_2N_3N_4B$ 即是翅膀在翅长 50% 处的弓形变形(如图3(b)所示)。

若已经得到翅膀某纵长位置的弦 AB 的空间坐标,则可以通过空间解析几何运算,计算出翅膀的各个角度参数。

5 试验结果与讨论

经过对蜻蜓翅膀的测量,可以恢复出其三维轮廓。图 4 中 (a) 和 (b) 分别为左后翅上某一段在不同扇翅过程中的三维重构。图中的坐标系以测量工作台为基准建立。从图中可以发现:上扇过程中翅膀在某纵长处弓形变形较小,而下扇时翅膀在相同纵长处弓形变形较大,即下扇时翅膀的弹性变形更大一些,这意味着下扇时的受力可能更大一些。同时可以发现,上扇时的扭转角比较小,而下扇时的扭转角比较大,这表明下扇时翅膀与气流更接近垂直状态,而这种垂直状态也有利于大升力的产生。

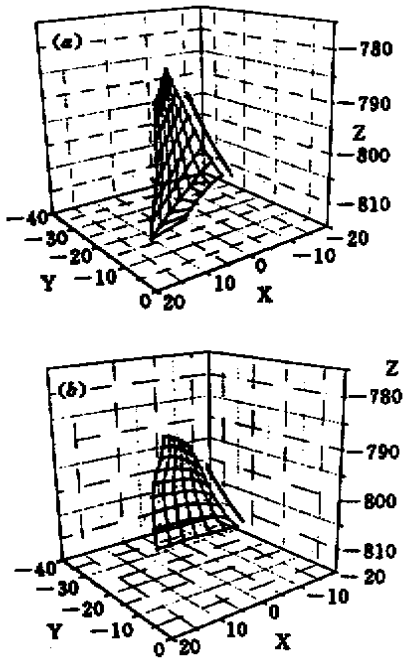


图 4 翅膀的三维重构(箭头方向为前缘方向)
(a) 上扇过程,扇翅角为 +1 (b) 下扇过程,扇翅角为 +1

Fig.4 3D reconstructed wing

(The arrow indicates the leading edge)

(a) up-stroke with a flapping angle +1 ;

(b) down-stroke with a flapping angle +1

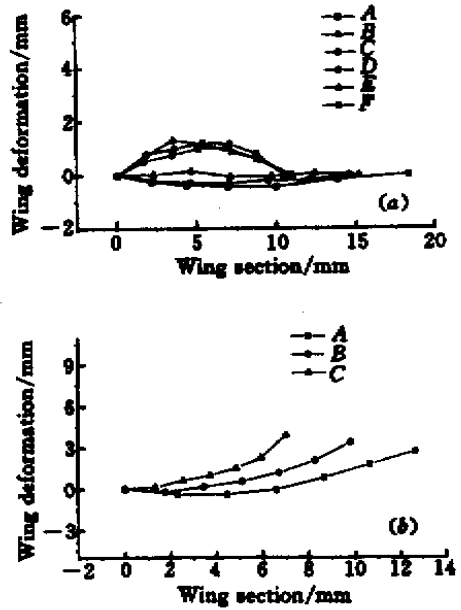


图 5 翅膀的弓形变形

(a) 不同扇翅位置时翅膀长 50% 处的弓形变形 (b) 某扇翅位置时翅膀上不同翅长位置的扭转变形和弓形变形,本图对应于下扇中扇翅角为 26° 的翅膀, A, B, C 分别对应翅长的 25%, 50% 和 75%

Fig.5 Reconstructed camber deformation of the wing

(a) camber deformations with different flapping angles at 50% of the leading edge. A, B, C : up-stroke with the three flapping angles are -26°, 1°, 16°, respectively. D, E, F : down-stroke with the three flapping angles are 26°, 1°, -19°, respectively; (b) torsion and camber deformations at different position of the wing, down-stroke with a flapping angle 26°. A, B, C are with different positions at 25%, 50% and 75% of the leading edge, respectively

为了更清晰地比较上扇过程和下扇过程中翅膀的弓形变形,图 5(a) 中给出上扇的三个位置和下扇的三个位置。A, B, C 代表上扇过程的三个位置,扇翅角分别为 -26°, 1°, 16°, D, E, F 代表下扇过程的三个位置,扇翅角分别为 26°, 1°, -19°。这里可以定量地看出下扇过程中的弓形变形要明显小于上扇时的弓形变形。这可能是由于下扇时要提供飞行所需的升力,从而使翅膀受到更大的弹性力所致。图 5(b) 给出翅膀从扇翅的最高点刚刚下扇不久(扇翅角 26°)时的翅膀变形情况。从中可见靠近翅膀根处(25%)的弓形变形较小(图 5(b) 中曲线 A),而靠近翅膀尖处(75%)的弓形变形较大(图 5(b) 中曲线 C)。这可能是由于翅膀尖相对于翅膀根有更高的线速度,因此其受力较大,从而产生了较大变形。

6 结论

从以上结果可以看出,使用梳状投影条纹法可以测量到蜻蜓扇翅运动中翅膀的弓形变形和扭转变形,不需要以往的条杆法等方法必须的刚体假设。通过测量发现在扇翅运动中翅膀产生较大的弹性变形。这种测量可以帮助流体力学建立更为精确的翅膀模型,从而对蜻蜓飞行中的升力来源给出更为精确、科学的解释。

在实验中由于蜻蜓翅膀的特殊性,我们使用光栅投影条纹激光器代替通常的正弦光栅来产生精细的梳状条纹。由于条纹较细,相对集中了光能,从而可以比较方便地识别几乎透明的翅膀上的变形条纹。同时避免了使用正弦光栅带来的空间分辨率的降低。而后利用插值法得到梳状条纹间隙处的数据,从而求出翅膀上感兴趣部分的扇动变形和扭转角。使用空间解析几何处理数据,使转换方便,概念清晰,可以方便地由拍摄到的图像求出翅膀的扇动变形和扭转角。此方法还可以方便准确地测量蜻蜓

翅膀的运动参数,从而为分析昆虫的运动机理提供了宝贵的测量数据。

参 考 文 献

- 1 L. Zeng, H. Matsumoto, K. Kawachi. A fringe shadow method for measuring flapping angle and torsional angle of a dragonfly wing. *Meas. Sci. and Technol.*, 1996, **7**: 776 ~ 781
- 2 A. P. Willmott, C. P. Ellington. The mechanics of flight in the hawkmoth *manduca sexta*, I. Kinematics of hovering and forward flight. *J. Exp. Bio.*, 1997, **200**: 2705 ~ 2722
- 3 R. Dudley, C. P. Ellington. Mechanics of forward flight in bumblebees. I. Kinematics and morphology. *J. Exp. Bio.*, 1990, **148**: 19 ~ 52
- 4 A. P. Willmott, C. P. Ellington. Measuring the angle of attack of beating insect wings: Robust three-dimensional reconstruction from two-dimensional images. *J. Exp. Bio.*, 1997, **200**: 2693 ~ 2704
- 5 H. Zhang, M. J. Lalor, D. R. Burton. Spatiotemporal phase unwrapping for the measurement of discontinuous objects in dynamic fringe-projection phase-shifting profilometry. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(16): 3534 ~ 3541