

文章编号: 0253-2239(2006)01-0061-6

# 基于单摄像机的昆虫自由飞行参量三维重构\*

赵创新<sup>1,2</sup> 徐进良<sup>1</sup> 张永立<sup>1</sup> Zhang Yang<sup>3</sup>

{ 1 中国科学院广州能源研究所微能源系统实验室, 广州 510640  
2 中国科学院研究生院, 北京 100039  
3 曼彻斯特理工大学航空机械制造系, 英国

**摘要:** 研究昆虫飞行的三维空间运动参量需要对二维图像进行重构, 传统的重构方法是采用两个或者多个相机从不同角度拍摄以获得同时刻不同角度的图像。介绍了一种采用单一相机完成三维重构的方法。通过在单相机镜头前面附加四块两两平行的平面镜组来获得三维信息, 该装置可以在同一照片上获得物体两个角度的观察图像, 等效于用两个高速摄影仪对昆虫的飞行进行拍摄。分别标定出每个等效摄像机的参量, 根据机器视觉原理进行三维重构。实现了用单个相机完成昆虫自由飞行状态的翅膀三维参量重构过程, 避免采用多个相机的需要增加复杂同步电路以及引起的高额费用, 同时也克服了过去基于单相机的三维重构需要增加某些假设所引起的与真实飞行的差异。

**关键词:** 光学测量; 仿生学; 自由飞行; 三维重构

中图分类号: Q96; TB8; O335 文献标识码: A

## Three-Dimensional Reconstruction of Free-Flying Insect Based on Single Camera

Zhao Chuangxin<sup>1</sup> Xu Jinliang<sup>1</sup> Zhang Yongli<sup>1</sup> Zhang Yang<sup>2</sup>

{ 1 *Micro Energy System Lab, Guangzhou Institute of Energy Conversion, The Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640*  
2 *Graduate School of the Chinese Academy of Science, Beijing 100039*  
3 *Department of Mechanical, Aerospace & Manufacturing Engineering, UMIST 561000, United Kingdom*

**Abstract:** Studying three-dimensional dynamic parameters of an insect flight requires reconstructing from 2D images, and two or more cameras are needed to capture images from different angles at the same time in the conventional method. A new method has been introduced. By adding four plane mirrors onto a high-speed camera, two different images are projected on the same frame, which is equivalent to that obtained using two cameras. Through calibrating the two optical paths, the external and intrinsic parameters can be computed, and then the three-dimensional information of fly's wings by using the mechanism of machine vision can be constructed. In contrast with conventional methods it is simple, inexpensive for three-dimensional reconstruction; moreover, there is no assumptions during reconstruction.

**Key words:** optical measurement; bionics; free flying; three-dimensional reconstruction

### 1 引 言

昆虫具有高超的飞行技巧<sup>[1]</sup>, 可以在极短的时间内完成一系列复杂的飞行动作, 如: 快速启动、急速转弯、翻跟头等。近年来微型飞行器 (Micro air vehicle, MAV) 概念更加速了科学家们对昆虫飞行仿生学的研究。由于三维信息总是隐藏在二维图像中, 为了能够定量地分析, 需要对二维图像进行三维重构来获得

三维信息。双目视觉是三维测量的主要方法<sup>[2]</sup>。理想的三维重构需要在两个或者多个视点同时观测, 如 Wilmott 和 Ellington<sup>[3]</sup> 采用两个相机对悬停和前飞的天蛾 (*Manduca Sexta*) 的飞行过程进行了研究; Askew 等<sup>[4]</sup> 采用两个相机计算了昆虫的起飞过程质心的运动轨迹; Fry 等<sup>[5]</sup> 采用三个摄像机捕获了果蝇自由转弯过程翅膀拍动模式, 翅膀拍动的角度、速度等; 但是

\* 国家自然科学基金(10272102)和中国科学院国际合作重点项目资助课题。

作者简介: 赵创新(1980~), 男, 内蒙古集宁人, 中国科学院广州能源研究所硕士研究生, 主要从事微能源系统能量仿生研究。E-mail: cxzhao@ustc.edu

收稿日期: 2005-01-11; 收到修改稿日期: 2005-05-11

昆虫的翅膀高频拍击(例如果蝇的拍击频率为 200 Hz<sup>[6]</sup>),自由飞行较强的机动性对高速摄像机性能要求较高,采用多个相机还会有诸多的不一致性<sup>[7]</sup>,需要附加同步电路等,实验人员受实验条件的限制往往只能采用一个高速摄像机来观察<sup>[8]</sup>。

采用单个相机也可以完成三维重构,如采用灰度法<sup>[9]</sup>。Dudley 和 Ellington<sup>[10]</sup> 基于左右两边翅膀对称假设的前提下用单个摄像机观察了大黄蜂在旋转条纹和紫外光刺激下的自由前飞过程,获得了大黄蜂在自由前飞过程中的拍动角、翅尖轨迹等。Willmott 和 Ellington<sup>[11]</sup> 总结了单摄像机三维重构方法如对称法、平面法、条杆法、标记法等,通过对比,条杆法是实验中最精确和稳定的一种方法,但是需要假设被测量翅膀是绕一个已知的刚性轴旋转。真实的飞行过程都很难和这些假设吻合,做出这些假设都只是一种近似,因此基于单一摄像机实现从二维到三维的转换要求提出新的、更为可行的方法。Zeng 等<sup>[12]</sup> 给出了一种用反射镜和一个摄像机同时拍摄两个方向的图像研究昆虫飞行。

早期的工作多是基于捆绑的昆虫来研究其飞行动作的,观察到了一些基本的拍动规律。但是由于捆绑与自由飞行的存在一定的差异,捆绑状态的研究结果还不能完全反映自由飞行状态下的运动形式。实现自由飞行状态的飞行参量观测是近年来的研究趋势<sup>[10,13,14]</sup>。

本文在单一高速摄像机镜头前面增加附加光学装置体视镜(stereo adapter)实现三维重构。该装置由两两平行的四块平面镜组成,呈现对称分布,物体发出的光进入镜头被分成两束,分别透射在底片的两侧。使得同一物体通过该装置后形成两个物像。由于两组平面镜与物体的相对位置不同,可以等效于使用两个高速相机对从不同角度对物体进行

拍摄。给出了一种基于单一摄像机的三维重构新方法,该方法可以用来测量自由飞行昆虫的翅膀三维信息,克服了过去基于翅膀拍动某些假设的限制。

## 2 实验装置与方法

### 2.1 实验活体

选取苍蝇作为研究对象,观察其机动飞行过程左右两个翅膀参量。苍蝇活体是在户外捕获的,选取最活跃的作为实验对象,将其置于尺寸为 100 mm×100 mm×80 mm 的玻璃箱体中。为了不让强烈的背景灯光对其活力产生影响,每次实验时间控制为 45 min 左右。

### 2.2 实验装置及原理

在高速摄像机(HG-100K, Redlake MASD)镜头(Nikon Macro 1:2,  $\phi 72$  mm)前面加了一个光学装置(Stereo adapter,  $\phi 52$  mm, Pentax),图 1 所示整体设备安装结构图示意。高速摄影的拍摄速度是 3000 f/s,曝光时间为 330  $\mu$ s,照片像素尺寸为 800×600,投影灯工作功率为 1000 W。

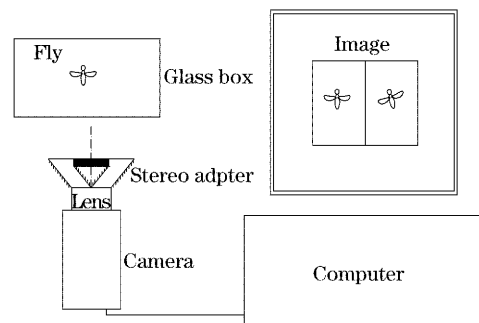


图 1 实验装置图

Fig. 1 The experimental system

该体视镜(Stereo adapter)由四块平面镜构成,对称地分布在轴线两侧,如图 2(a)所示。左

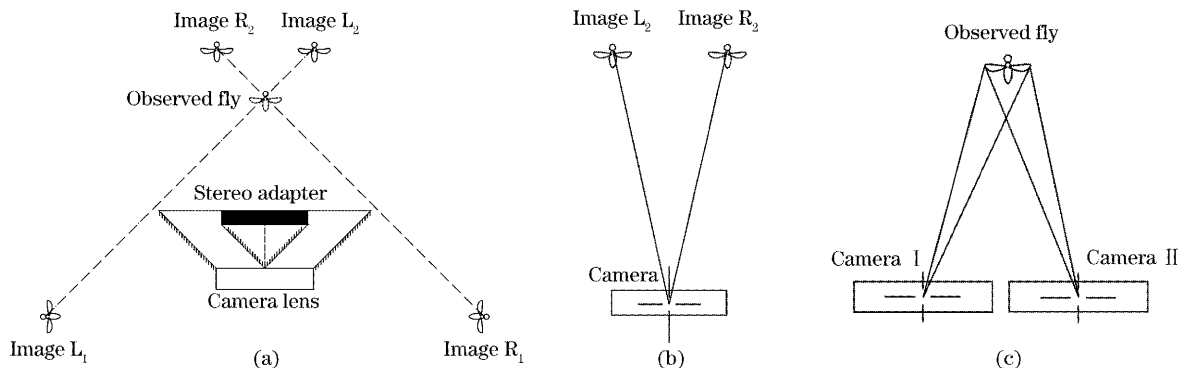


图 2 体视镜原理图

Fig. 2 The optical mechanism of stereo adapter

边、右边的两块分别平行,中间、两侧的两块分别垂直。前方的物体首先经过两侧较长的一组平面镜在左右两侧成像  $L_1$  和  $R_1$ ,然后在由中间较短的一组平面镜对  $L_1$  和  $R_1$  再次成像  $L_2$  和  $R_2$ 。其中  $R_2$  位于左边, $L_2$  位于右边,由于平面镜成像等大,在经过两次成像以后得到的  $L_2$  和  $R_2$  没有改变像的大小。从图 2(b)中可以看出,经过该装置以后拍摄的效果等同于高速摄像机直接对像  $L_2$  和  $R_2$  两处的物体进行拍照。由于  $L_2$  和  $R_2$  是活体的两个角度的成像,等效于对活体用两个相机拍摄,如图 2(c)示意,在同一幅照片上得到了两个不同的像。把左边的光路看作一个摄像机 I,右边的光路也看作一个摄像机 II,两个摄像机符合双目视觉三维重构的要求。利用这一装置可以实现对物体的三维重构。

### 2.3 标定以及三维重构算法

三维重构要求分别获得两个相机的内外参量以及两个相机的空间位置关系,为此需要对两个等效的摄像机进行标定。相机的标定过程就是求出空间坐标和图像坐标之间的对应矩阵转换关系,即在(1)式中,确定出标定块上特征点的空间坐标  $(X_w, Y_w, Z_w)$  以及对应点在图像上的像素坐标  $S(u, v)$  求出转换矩阵  $M$

$$S \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = M_{3 \times 4} = \begin{bmatrix} X_{wi} \\ Y_{wi} \\ Z_{wi} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中  $M = K[r_1, r_2, r_3, t]$ ,  $K$  为摄像机的内部参量矩阵,  $(r_1, r_2, r_3)$  为旋转矩阵,  $t$  为平移矩阵<sup>[16]</sup>。

平面板标定方法<sup>[17]</sup>,基本原理是假定模板平面在空间坐标系  $Z=0$  的平面上,故(1)式改写成(2)式的形式:

$$S \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = K[r_1, r_2, t] \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

打印一张如图 3(a)所示的模板贴在一个平板上作为标定板。标定板由黑白相间的正方形格子构成。取标定板最左上方的格子的顶点作为空间坐标的原点,空间坐标系  $xyz$  轴如图 3(a)所示,格子边长均为 5 mm。从不同角度拍摄若干张模板图像,检测出图像中的特征点,求出相机的内外参量以及畸变系数。先将模板与左边图像的对应关系标定看做第一个等效摄像机的参量,然后对右边的进行同样的处理得到第二个等效相机的参量。

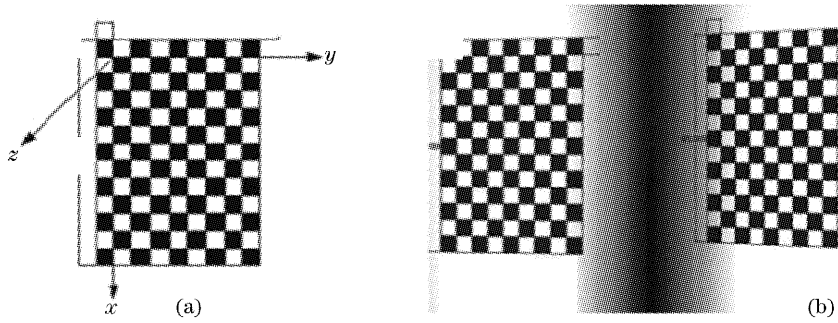


图 3 标定板及其成像

Fig. 3 Calibration board and its image

令  $m_{ij}$  是(1)式中矩阵  $M$  的  $i$  行  $j$  列的元素,对左边等效摄像机每个点都可以将(1)式写为方程组(3)的形式:

$$X_{wi}m_{11} + Y_{wi}m_{12} + Z_{wi}m_{13} + m_{14} - u_iX_{wi}m_{31} - u_iY_{wi}m_{32} - u_iZ_{wi}m_{33} = u_im_{34}, \quad (3)$$

$$X_{wi}m_{21} + Y_{wi}m_{22} + Z_{wi}m_{23} + m_{24} - v_iX_{wi}m_{31} - v_iY_{wi}m_{32} - v_iZ_{wi}m_{33} = v_im_{34},$$

同样该点在右边光路也可以写出(3)式的形式,故对于空间同一个点可以写出 4 个方程,如方程组(4)所示:

$$\begin{aligned} (u_1m_{31}^1 - m_{11}^1)X_w + (u_1m_{32}^1 - m_{12}^1)Y_w + (u_1m_{33}^1 - m_{13}^1)Z_w &= m_{14}^1 - u_1m_{34}^1, \\ (v_1m_{31}^1 - m_{21}^1)X_w + (v_1m_{32}^1 - m_{22}^1)Y_w + (v_1m_{33}^1 - m_{23}^1)Z_w &= m_{24}^1 - v_1m_{34}^1, \\ (u_2m_{31}^2 - m_{11}^2)X_w + (u_2m_{32}^2 - m_{12}^2)Y_w + (u_2m_{33}^2 - m_{13}^2)Z_w &= m_{14}^2 - u_2m_{34}^2, \\ (v_2m_{31}^2 - m_{21}^2)X_w + (v_2m_{32}^2 - m_{22}^2)Y_w + (v_2m_{33}^2 - m_{23}^2)Z_w &= m_{24}^2 - v_2m_{34}^2, \end{aligned} \quad (4)$$

(4)式中上标为  $l$  的  $m$  元素表示为左边的光路参量。上标为  $r$  表示右边的参量。在(4)式中  $m_{ij}$  已通过标定获得,  $(u_i, v_i)$  可以通过图像获得, (4)式是三个未知数四个方程, 用最小二乘法解该方程组来计算图像坐标对应的空间坐标。

### 2.3 特征点识别

图像是灰度图像, 通过计算图像的灰度梯度来识别边缘轮廓。在 Matlab 中采用 Candy 算子先增强再提取边缘点集。由于翅膀拍动过程出现重叠, 遮挡导致难以识别特征点的位置。为此, 采用插值方法, 即将其前一个动作和后一个动作的中间位置作为遮挡时候的位置来计算。由于图像重叠, 重叠部分的灰度值将变小, 结合这两种方法可以有效地获得特征点的像素位置。

## 3 结果和讨论

### 3.1 误差分析

计算程序使用 Matlab 编写。为了检验完成三维重构的结果与真实目标长度的误差, 用该系统多次从不同角度测算了一已知边长物体, 计算的最大相对误差为 4.8%, 最小为 0.2%。表明用来计算苍蝇翅膀参量可以接受。误差主要是由对相关特征点的像素坐标提取引起。由于人为和边缘识别算法的原因导

致不能准确确定特征点的像素坐标, 采用亚像素 (sub-pixel) 处理方法可以进一步提高像素坐标精度。

### 3.2 图像分析

图 2 所示对物体经过两次平面镜成像后呈现出两个不同角度的像, 等效于从两个角度拍摄物体。如果苍蝇能在对称线上, 那么最后拍摄的图像也是对称结构。事实上, 苍蝇的飞行位置具有随机性, 飞行的位置可能是任何一个位置。图 4 给出了几种情形。在图 4(a) 为较为理想的情形, 可以看到两个图像。图 4(b) 中由于镜头的视场有限, 常常会出现照片上只有一个或者一个都没有的情形, 无法完成重构。提高拍摄速度会影响到其视场的大小<sup>[18]</sup>, 当

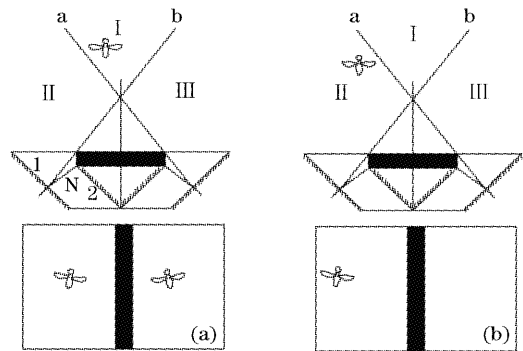


图 4 两种拍摄结果  
Fig. 4 Two different results

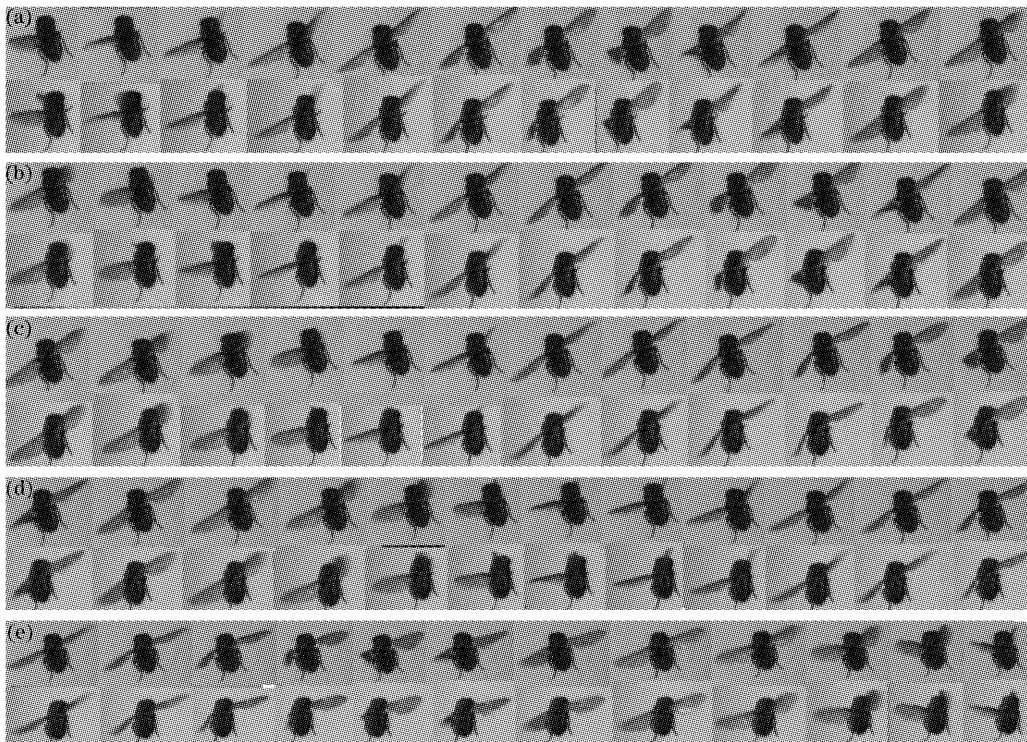


图 5 0~20 ms 的飞行姿态(间隔 1/3 ms)  
Fig. 5 Flying model during 0~20 ms (step 1/3 ms)

相机的速度为 1000 f/s 时,可以观察到范围约 20 cm,速度为 5000 f/s 时,视野范围还不到 2 cm,试验中 3000 f/s 可以观察到范围 5 cm 左右,这范围内苍蝇完成任何一个动作,在两边都可以看到清晰的图像。当飞行在图 4 中区域 I 时呈现两个像,可以完成重构,而出现在 II 和 III 则只能出现一个像或者一个都不出现,这样就无法进行重构。

### 3.3 重构翅尖轨迹

以左翅尖在整个过程中的空间坐标变化和空间轨迹为例子进行了计算。如图 5 所示在 0~20 ms 的飞行动作,上下分别是每时刻左右两侧的图像,图 6 给出了 0~20 ms 翅尖在空间  $x, y, z$  三个方向的空间坐标和运动速度的大小。

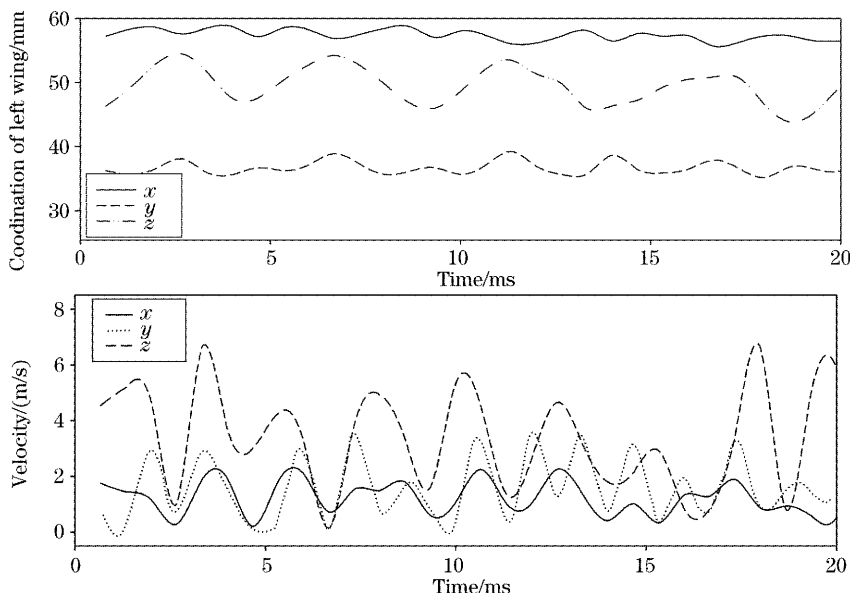


图 6 0~20ms 左翅尖空间  $X, Y, Z$  向坐标值及对应速度

Fig. 6 3D coordinate and velocity of left wing during 0~20 ms

## 4 结 论

介绍了一种在单摄像机上完成了三维重构方法,并采用该方法研究了昆虫自由飞行状态参量的测量。该方法避免采用两个高速相机引起的高额实验费用。是一种较为方便的昆虫自由飞行测量方法。利用测量结果可以拟合出昆虫不同飞行状态下的轨迹函数,为设计模型研究动力学参量提供了依据。

但是,由于视场的限制,该装置目前还不能适用与体积较大的昆虫的飞行测量。今后需改进研究大昆虫的飞行过程,或者小昆虫的更加复杂飞行动作的翅膀拍动模式,以及对应流场结构,能量消耗等。

### 参 考 文 献

- 1 Wei Shyy, Mats Berg, Daniel Ljungqvist. Flapping and flexible wings for biological and micro air vehicles [J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 1999, **35**(5): 455~505
- 2 Zeng Jiyong, Su Xianyu. A new rectification method of stereo pairs without calibration for cameras[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 628~632 (in Chinese)  
曾吉勇,苏显渝.一种无相机标定的立体图像对校正新方法[J]. *光学学报*, 2004, **24**(5): 628~632
- 3 Alexander P. Willmott, Charles P. Ellington. The mechanics flight in the hawk moth *Manduca sexta*. I. Kinematics of hovering and forward flight[J]. *J. Exp. Biol.*, 1997, **200**(21): 2705~2722
- 4 Graham N. Askew. The mechanical power output of the flight muscles of blue-breasted quail (*Coturnix chinensis*) during take-off[J]. *J. Exp. Biol.*, 2001, **204**(21): 3601~3619
- 5 Steven N. Fry, Rosalyn Sayaman, Michael H. Dickinson. The aerodynamics of free-flight maneuvers in *Drosophila*[J]. *Science*, 2003, **300**(5618): 495~498
- 6 Sanjay P. Sane. The aerodynamics of insect flight[J]. *J. Exp. Biol.*, 2003, **206**(23): 4191~4208
- 7 Jia Dongyao, Ding Tianhuai. A novel method for dynamic calibrating non-uniform of multiple CCD imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(4): 485~490 (in Chinese)  
郑东耀,丁天怀.多路 CCD 成像非一致性动态校正新方法[J]. *光学学报*, 2005, **25**(4): 485~490
- 8 Coew Van Den Berg. A quantitative, three-dimensional method for analyzing rotational movement from single-view movies[J]. *J. Exp. Biol.*, 1994, **191**(1): 283~290
- 9 Liu Zhangwen, Gu Tianxiang. Three-dimensional measurement of object by using gray gradient of CCD image[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(11): 1384~1388 (in Chinese)  
刘章文,古天祥.利用 CCD 图像的灰度梯度实现物体三维测量[J]. *光学学报*, 2003, **23**(11): 1384~1388
- 10 R. Dudley, C. P. Ellington. Mechanics of forward flight in bumblebees. I. Kinematics and morphology[J]. *J. Exp. Biol.*, 1990, **148**(1): 19~52

- 11 Alexander P. Willmott, Charles P. Ellington. Measuring the attack of beating insect wings: Robust three-dimensional reconstruction from two-dimensional images[J]. *J. Exp. Biol.*, 1997, **200**(21): 2693~2704
- 12 Lijiang Zeng, Qun Hao, Keiji Kawachi, Measuring the body vector of a free flight bumblebee by reflection beam method[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2001, **12**(6): 1886~1890
- 13 Hao Wang, Lijiang Zeng, Hao Liu *et al.*. Measuring wing kinematics, flight trajectory and body attitude during forward flight and turning maneuvers in dragonflies[J]. *J. Exp. Biol.*, 2003, **206**(4): 745~757
- 14 Lijiang Zeng, Hiokazu Matsumoto, Keiji Kawachi. A fringe shadow method for measuring flapping angle and torsional angle of a dragonfly wing[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1996, **7**(5): 776~781
- 15 C. Schilstra, J. H. Van Hateren. Blowfly flight and optic flow. I. Theorax kinematics and flight dynamics[J]. *J. Exp. Biol.*, 1999, **202**(11): 1481~1490
- 16 Ma Songde, Zhang Zhengyou. *Computer Vision* [M]. Beijing: Science Press, 1998. 72~75 (in Chinese)  
马颂德,张正友. 计算机视觉[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 72~75
- 17 Zhengyou Zhang. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(11): 1330~1334
- 18 Lance F. Tammmero, Michael H. Dickinson. The influence of visual landscape on the free flight behavior of fruit fly *Drosophila melanogaster*[J]. *J. Exp. Biol.*, 2002, **205**(3): 327~343