

基于光投影数字化传感系统的飞蝗表面 三维结构^{*}

王 军^{1**} 李阿蒙² 刘晓利² 刘志刚^{1***}

(1. 深圳大学医学院 深圳 518060; 2. 深圳大学光电工程学院 深圳 518060)

摘 要 本文基于结构光投影数字化传感系统构建东亚飞蝗 *Locusta migratoria manilensis* 表面的三维结构。首先得到其外形尺寸和肢体各部分拓扑结构, 然后从被调制的条纹结构光中恢复出物体表面高度变化的相位信息, 再通过相位和高度的对应关系重建出物体表面三维特征。此结果将为农药研制和施用设计提供科学依据, 对促进蝗虫的防治以及虚拟昆虫研究起到积极作用。

关键词 结构光投影, 数字化传感系统, 三维结构, 东亚飞蝗

The three dimensional structure of the migratory locusts' s exoskeleton as revealed by a light projection digital sensing system

WANG Jun^{1**} LI A-Meng² LIU Xiao-Li² LIU Zhi-Gang^{1***}

(1. School of Medicine, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 2. College of Optoelectronic
Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract The three dimensional structure of the *Locusta migratoria manilensis* exoskeleton was constructed using a light projection digital sensing system. We first obtained data on the shape dimensions and topological structure of body parts of individual locusts. We then recovered highly variable phase information on the objective surface of each structure from a modulated strip of light. The corresponding relationship between light phase and height allowed three-dimensional surface features to be reconstructed. The results will be valuable for pesticide design and locust control.

Key words structured light projection, digital sensing system, 3D structure, *Locusta migratoria manilensis*

蝗虫是世界性的重要害虫, 蝗灾常与水灾、旱灾经常相间或相伴发生, 成为严重威胁农业生产和人民生活的三大自然灾害之一。中国自古就是一个受蝗灾危害严重的国家, 蝗灾危害面积广, 且爆发频次高, 给农业生产和国民经济造成严重危害(朱恩林, 1999; 陈永林, 2000)。目前国内外关于蝗虫的研究有很多, 每年都有近百篇的论文发表, 其中关于蝗虫本身机理性的研究一直是寻找防蝗措施的重要途径。在蝗虫组织结构研究方面, 自 20 世纪 80 年代以后, 除了传统的解剖形态学研究外, 研究的重点已经集中在对蝗虫的超微结构和功能进行研究, 如飞蝗消化系统的超微结

构的研究(Peacock, 1986), 也包括对蝗虫肌肉超微结构和神经节形态和神经元分布的全面研究(李春选和马恩波, 2003)等。三维重建技术是利用图像信息获取物体空间结构的一种技术, 是计算机视觉领域最热门的研究方向之一, 其可以利用图形图像刻画物体特征, 以达到最易被人理解的视觉效果和实体的逼真显示, 因此该技术在当代医学和细胞生物学中获得了广泛运用(张宗华等, 2004; 高鹏东等, 2006)。然而, 尽管目前显微技术、可视化和数字化技术已趋于成熟, 并且在研究昆虫的细微形态结构研究方面有着良好的应用前景(Huber *et al.*, 2001), 但是关于昆虫数字化虚

* 资助项目: 国家 863 计划(2006AA10Z236)。

** E-mail: yxywj@szu.edu.cn

** 通讯作者, E-mail: lzg@szu.edu.cn

收稿日期: 2011-10-30, 接受日期: 2011-12-16

拟和三维形态重建的研究却还刚起步。国外仅见于一些关于昆虫局部结构特征的三维重建报道,如双翅目昆虫生殖器(Klaus *et al.*, 2003)。国内也仅开展了一些关于螨类和蜚蠊的消化系统三维重建的研究工作(张莺莺等, 2007)。

1 材料与方法

1.1 材料来源

东亚飞蝗,由中国科学院动物研究所农业虫害鼠害综合治理研究国家重点实验室提供。

1.2 方法

采用摄像机和投影仪构成的双目立体测量装置,利用结构光投影方式投射特征至待测物体上,通过相位特征得到对应点关系,实现可靠的立体匹配,采用三角法实现空间点测量。其结构光编码于解调部分使用了基于结构光投影的时间相位展开算法。将一组空间非相干正弦波条纹结构光投射到待测物体表面,投影条纹由于受到物体表面高度变化受到空间相位的调制而发生形变,因此物体表面高度变化信息就被记录在变形的条纹结构光内,解调的过程就是从被调制的条纹结构光中恢复出物体表面高度变化的相位信息,再通过相位和高度的对应关系重建出物体表面三维特征。

1.2.1 结构光编码与解调 基于结构光投影三维数字化传感系统结构如图1,系统主要由结构光投影装置和图像采集装置组成。

采用平行于 y 轴而沿 x 轴方向正弦周期变化的投影结构光作为载波光源,其光强函数为: $I_0(x, y) = A_0 \cos(2\pi f_0 x)$,将该光源投射至物体表面并经过物体表面高度编码变形以后的摄像机采集到的变形条纹光强分布可表示为:

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cdot \cos [2\pi f_0 x + \phi(x, y)] \quad (1)$$

其中, $I(x, y)$ 为记录到的物面光强分布, $a(x, y)$ 为背景光强分布, $b(x, y)$ 为条纹的局部对比度; f_0 为载波频率; $\phi(x, y)$ 为与物体表面形状相关的相位因子。相位解调的目的就是要解码物体表面高度信息的相位函数 $\phi(x, y)$ 。

1.2.2 相移算法和相位展开算法 采用相移算法,需要投影3幅以上相同频率不同相位的条纹结构光对物体表面进行编码并获取相应条纹编码

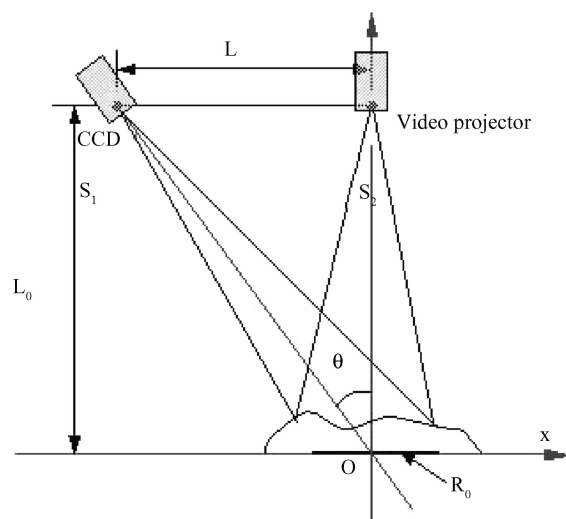


图1 基于结构光投影三维数字化传感系统

Fig. 1 Based on structured light projection three-dimensional digital sensor system

图。采用 N 步相移时,每次投射到物体表面的条纹结构光的相移量为 $2\pi/N$,参照式(1),得到的 N 幅调制条纹图的光强为:

$$I_n(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos (2\pi f_0 x + \phi(x, y) + 2n\pi/N) \quad (2)$$

$$n = 1, 2, \dots, N$$

由上面的 N 个式子可以求出相位值为:

$$\phi(x, y) = -\arctan \frac{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \sin(2n\pi/N)}{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \cos(2n\pi/N)} \quad (3)$$

通过相移算法得到的相位都是存在间断点的(或说跳变、折叠)需要通过相位展开得到结果。广义方法(GTPU),该算法利用: $\omega = \phi_u(t_1)/t_1 = \phi_u(t_2)/t_2$,即 $\phi_u(t_2) = k \cdot \phi_u(t_1)$,其中 $k = t_2/t_1$,采用 $k \cdot \phi_u(t_1)$ 对条纹数为 t_2 编码条纹图得到的折叠相位进行展开:

$$\phi_u(t_2) = \phi_u(t_2) - 2\pi \times NINT \left[\frac{\phi_u(t_2) \cdot \phi_u(t_1) \cdot k}{2\pi} \right], k = t_2/t_1 \quad (4)$$

1.2.3 空间相位分布与物体表面深度像的映射关系 经过相位展开操作以后,得到的展开相位图记录与物体表面深度变化有关的相位信息,最终得到物体的物体表面深度变化,还必须进行相位到深度转换。物体表面某点高度值 z 、编码采用

空间条纹频率 f_0 与编码相位图得到的相位值关系,由式(5)可重建空间中的三维点坐标。

$$\phi(z) = \frac{2\pi f_0 Lz}{L_0 - z} \quad (5)$$

2 结果与分析

通过结构光投影三维数字化传感系统,直接得到蝗虫表面的采样点数据,此数据分辨率由相机分辨率决定,数据精度由系统的标定精度决定。此时的采样点数据也称为点云数据,点与点之间缺少相对连接拓扑关系。为便于数据分析处理和

显示,需要将点云数据化为具有相互连接关系的三角网格数据。我们使用 Geomagic 软件来实现此过程。通过点云连接三角面片的操作后,将其放置于加入光照的虚拟空间中,我们可以清晰的分辨出蝗虫各个部分形状和连接关系,同时可以通过交互精确测量各部分尺寸。三维数字化结果如图 2。其中,左上图为点云数据,其他 3 幅为通过光照渲染显示的三维网格拓扑数据。通过此数据,我们可以得到蝗虫形体各部分尺寸,精确的分辨表面细微结构。

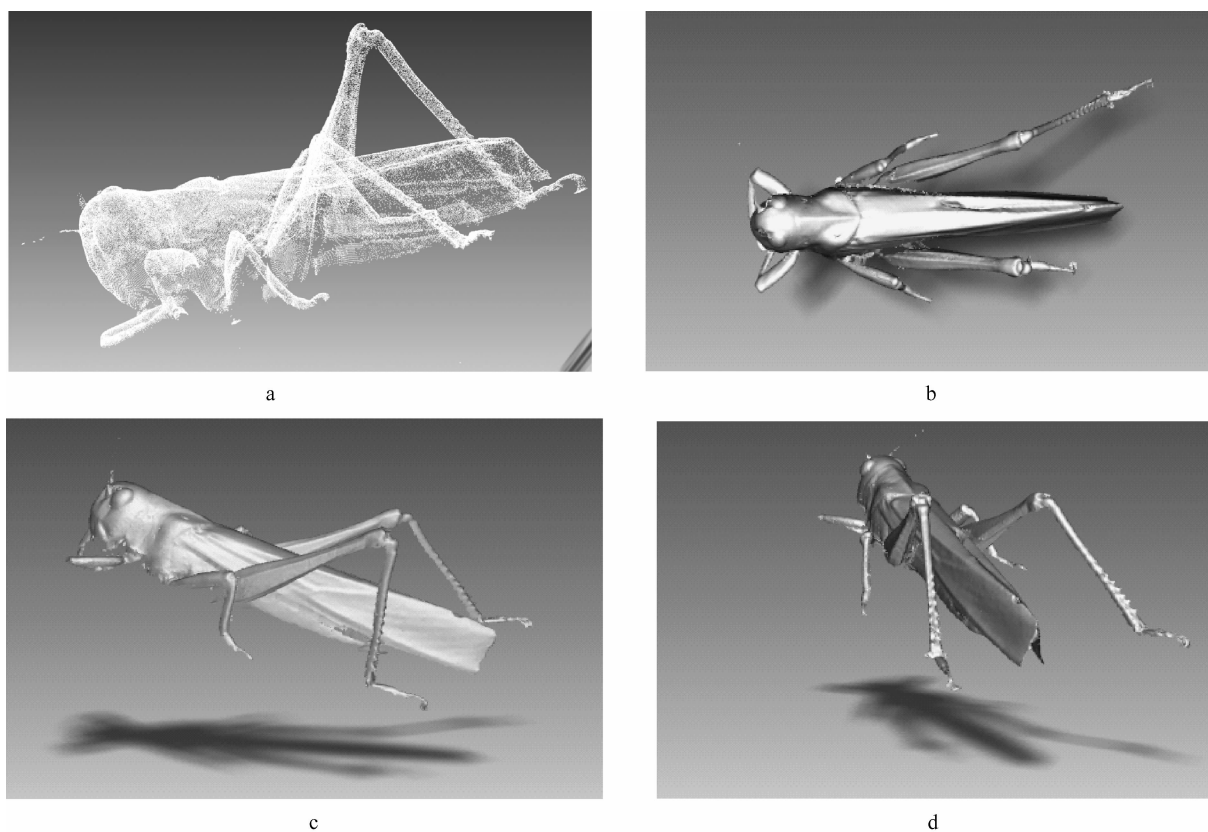


图 2 三维数字化结果

Fig. 2 The results of three-dimensional digital

A. 点云数据; B. 三维网格拓扑数据 1; C. 三维网格拓扑数据 2; D. 三维网格拓扑数据 3。

A. point cloud data; B. 1 three-dimensional mesh topology data; C. 2 three-dimensional mesh topology data;

D. 3 three-dimensional mesh topology data.

3 讨论

本研究通过基于结构光投影三维数字化传感系统构建东亚飞蝗,对蝗虫形态可视化研究,可大

幅度提高对蝗虫生理结构和功能的了解,并可以逐步实现对各类感受器标准模式的三维图象数字化模拟,从而为新药开发和农药的科学施用提供指导和依据。同时,作为一种重要的模式昆虫,蝗

虫三维形态的重建还可为昆虫学教育提供了教学素材,为进一步的深入研究建立了良好的技术平台。本研究国内外尚未见报道,属原创性研究。并使我国在虚拟昆虫技术方面达到世界先进水平,同时为其它农林害虫的三维形态构重建提供技术支持。因此,本项目的完成将具有重要的理论意义和现实意义。三维形态结构与农药作用过程建模的研究,为农药研制和施用设计提供科学依据。本项目的实施对促进蝗虫的防治以及虚拟昆虫研究将起到积极作用。

参考文献 (References)

- Huber D, Keller M, Robert D, 2001. 3D light scanning macrography. *J. Morphol.*, 203(2):208—213.
- Klaus AV, Kulasekera VL, Schawaroch V, 2003. Three-dimensional visualization of insect morphology using confocal laser scanning microscopy. *J. Morphol.*, 212(2): 107.
- Peacock AJ, 1986. Ultrastructure of the ileum of *Locusta migratoria*. *J. Morphol.*, 188(2):191—202.
- 陈永林, 2000. 中国的飞蝗研究及其治理的主要成就. 昆虫知识, 37(1):50—59.
- 高鹏东, 彭翔, 田劲东, 刘则毅, 2006. 三维人脸建模中面部特征轮廓线的提取. 系统仿真学报, 18(8):2105—2108.
- 李春选, 马恩波, 2003. 飞蝗研究进展. 昆虫知识, 40(1): 24—30.
- 张莺莺, 刘志刚, 孙新, 包莹, 李盟, 2007. 粉尘螨消化系统的形态学观察. 昆虫学报, 50(1):85 — 89.
- 张宗华, 彭翔, 刘常青, 胡小唐, 2004. 基于 CT 的头颅骨三维表面重建. 中国生物医学工程学报, 23(5):392—397.
- 朱恩林, 1999. 中国东亚飞蝗发生与治理. 北京. 中国农业出版社. 1—286.