

文章编号 1004-924X(2007)10-1616-06

昆虫翅膀运动变形测量中的图像特征提取

江 洁, 费金娥, 王 颖, 张广军

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100083)

摘要:通过分析翅脉图像的特点, 提出了一种用于提取昆虫图像翅脉和翅脉交点的亚像素级图像处理方法。该方法应用小波理论对图像消噪, 并采用中值滤波预处理图像, 然后利用小波同态滤波和双线性广义模糊相结合的算法增强图像的翅脉信号。应用基于 Hessian 矩阵的亚像素提取算法提取翅脉中心点的位置, 并根据翅脉方向变化的连续性, 利用邻域角度约束方法确定翅脉交叉点。最后, 给出几种算法实验结果的比较和分析, 结果表明, 该方法成功实现了翅脉和翅脉交点特征的提取, 并有效抑制了噪声和干扰。

关键词: 图像处理; 翅脉; 小波同态滤波; 广义模糊增强; 特征提取

中图分类号: TP391.4 文献标识码: A

Image feature extraction in insect kinetic deformation measurement

JIANG Jie, FEI Jin-e, WANG Ying, ZHANG Guang-jun

(School of Instrument Science and Photoelectric Engineering,
Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: An image processing method for extracting sub-pixel of wing veins and vein junctions of insect images is proposed. The image of wing veins is denoised by wavelet, and then enhanced by wavelet homomorphic filter and bilinear generalized fuzzy. The center positions of wing veins are extracted by the sub-pixel extracting algorithm based on Hessian matrix, and vein junctions are determined by the neighboring angle constraint and continuity of vein direction. The experiment results show that compared with other methods, the proposed approach can extract wing veins and vein junctions successfully, and can suppress the noise and disturbance effectively.

Key words: image processing; wing vein; wavelet homomorphic filtering; generalized fuzzy enhancement; feature extraction

1 引 言

立体视觉测量方法是目前昆虫翅膀运动变形测量中被广泛采用的方法。图像特征信息的提取

是实现机器视觉昆虫运动参数测量的前提, 只有提取到高精度的图像特征信息, 才能实现高精度的机器视觉测量。但是在用高速摄像机拍摄昆虫翅膀运动序列图像时, 由于曝光时间短和昆虫翅膀本身的高速运动, 以及受昆虫表面结构特性的

影响,实际获取图像中的特征信号较微弱,使其提取难度很大。为使对翅脉和翅脉交点的提取结果达到亚像素级,王颖等采用 Hessian 矩阵求出灰度极值点方向,并用二次曲线拟合该方向的灰度变化,通过确定该曲线极值点位置来提取亚像素翅脉中心的位置,并通过邻域角度约束方法来确定交叉点,使特征信息的提取取得较好效果,但该方法对非常微弱的翅脉和翅脉交点,仍存在提取不到现象,而且存在虚假特征点。本文针对这种算法的局限性,全面分析了翅脉图像的特点,重点对如何增强图像中的翅脉信号进行了深入研究。利用基于 Hessian 矩阵的条纹中心点提取方法对增强处理后的图像进行亚像素翅脉中心点的提取,并利用邻域角度约束方法确定翅脉交叉点,成功实现了特征信息的精确提取。论文最后给出对实际图像的提取结果,并与以前算法的提取结果进行了比较。

2 翅脉图像的特点及灰度分布的数学模型

2.1 翅脉图像特点

图 1 为立体视觉测量法拍摄到的昆虫翅脉和翅脉交点图像。翅脉遍布整个翅膀区域,纵横交错,粗细不等,翅基部是主翅脉起始的地方,主翅脉在图像中表现为较粗的暗线条,同时主翅脉上又逐级分支出许多细小翅脉,即图像中较细的暗线条。对于昆虫序列图像,一般较粗翅脉约有 2~3 个像素的宽度,其截面灰度分布为近似于曲线的暗线条,翅脉的方向连续变化。当主翅脉上分支出另一条翅脉时就会产生一个交点,它是两条不同方向的翅脉中心的交汇点,在图像上表现为两条方向变化较大的暗线条的交点。

图像中背景和被测目标都较暗,特征信息信号较弱,图像对比度低,而且存在许多随机噪声,这些都使得特征信息的提取非常困难。

2.2 翅脉截面灰度分布的数学模型

图 2 分别给出翅脉截面的灰度分布以及经高斯滤波后的灰度分布,显然灰度分布曲线的极值点即为翅脉中心点^[4]。

以翅脉中心点为原点,沿该点翅脉法线方向图像灰度分布的一维数学模型可以表示为:

$$f(x) = \begin{cases} h(1+(x/\omega)^2) & |x| \leq \omega \\ 0 & |x| > \omega \end{cases}$$

h 为灰度的极小值, ω 为曲线的宽度,曲线的顶点对应翅脉中心点的精确位置,翅脉中心点即为灰度函数一阶导(如图 3(a))的过零点和二阶导(如图 3(b))的正极值的点。

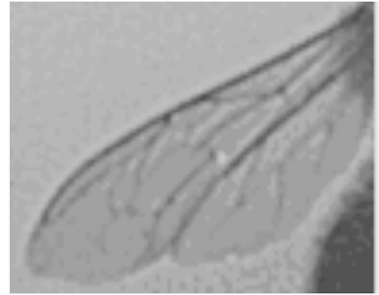
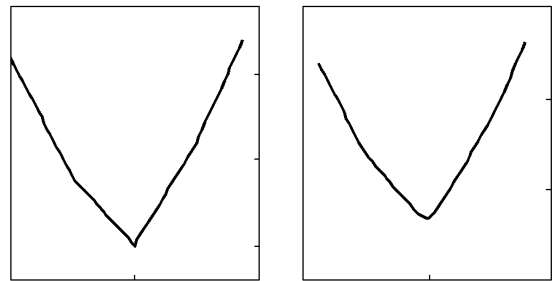


图 1 昆虫翅脉和翅脉交点图像

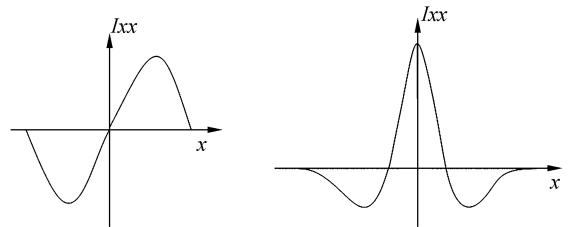
Fig. 1 Image of wing vein and vein junction of insect



(a) 翅脉截面灰度分布 (b) 高斯滤波结果
(a) Gray distribution of wing vein section (b) Gray distribution after Gaussian filter

图 2 翅脉截面灰度分布模型

Fig. 2 Gray distribution model of wing vein section



(a) 截面灰度分布一阶导 (b) 截面灰度分布二阶导
(a) First-order derivative of gray distribution (b) Second-order derivative of gray distribution

图 3 翅脉截面灰度分布的一阶和二阶导

Fig. 3 First and second order derivatives of gray distribution of wing vein section

3 翅脉图像的增强

3.1 增强算法原理

本文采用小波同态滤波和双线性广义模糊增强相结合的方法实现图像增强。

昆虫翅膀上的光强分布很不均匀,同态增强可减少光照不均匀引起的图像降质,并能对感兴趣的部分进行有效增强。传统同态增强在局部对比度增强效果上不能令人满意,小波变换具有时域频域“变焦距”特性^[5],把小波变换应用到图像同态增强中,处理后的图像具有明显的局部对比度增强效果,同时能较好保持图像的原始面貌。

一般的增强方法不能在增强翅脉信号的同时较好保持其边缘,而模糊增强^[6]通过适当调整参数可以将模糊不清甚至根本无法分辨的图像处理成清晰的含有大量有用信息的图像,并较好地保持其边缘。广义模糊集合比普通模糊集合具有更大的拉伸和变化范围。

3.1.1 小波同态滤波算法

小波同态滤波原理流程如下^[4]：

$$f(m,n) \rightarrow \text{Log} \rightarrow \text{WT} \rightarrow \text{LF} \rightarrow \text{IWT} \rightarrow \text{Exp} \rightarrow g(m,n)$$

首先对图像作对数变换(Log),再对二维图像进行小波变换(WT),即分别对图像进行水平和垂直方向的小波变换,形成具有方向选择性的高频带 HL, LH, HH 和低频带 LL。对低频带 LL 继续分解,得到多级分解层次。

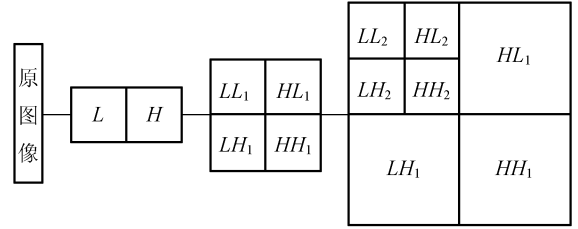


图 4 图像的 2 级小波分解示意图

Fig. 4 Scheme of 2 level wavelet decomposition

其中,小波滤波器表达式为:

$$H(j, \omega_h, \omega_v) = \gamma_1 - \gamma_2 \frac{1}{1 + 2.415((\omega_h^2 + \omega_v^2)^{1/2} / 2^j k_c)^4} \quad (1)$$

式中的 $H(j, \omega_h, \omega_v)$ 为各层高频小波系数的增强倍数,对低频小波系数不做处理。将处理后的小波系数做小波逆变换进行重构,经指数变换,得小波同态滤波处理后的图像。

3.1.2 双线性广义模糊增强算法

(1) 灰度图像空间的广义模糊化。应用式(2)把灰度图像空间 $I = (I_{ij})$ 变换到广义模糊空间 $P = (p_{ij}) \in [-1, 1]$ 。这里,取 $M = 90$;

$$p_{ij} = \text{LT}(I_{ij}) = \frac{I_{ij} - M}{I_{\max} - M} \quad (2)$$

(2) 广义模糊空间的增强处理。对于广义模糊空间 $P = (p_{ij})$,利用式(3)把广义模糊空间 $P = (p_{ij}) \in [-1, 1]$ 变化到普通模糊空间 $P' = (p'_{ij}) \in [0, 1]$,这里,取 $r = 3/4, t = 1/3$ 。事实上这个过程起到区域对比度的模糊增强作用。LGFO 是指其作用于广义模糊集合 A 可以产生一个普通模糊集 A' 的线性变换。

$$\mu_{A'}(x) = \text{LGFO}(\mu_A(x)) = \begin{cases} -\frac{r}{r+2t}\mu(x) + \frac{2t}{r+2t} & -1 \leq \mu(x) < -\frac{1}{2}(r+2t+1) + \frac{t}{r} \\ -\frac{r}{r-2t}\mu(x) - \frac{2t}{r-2t} & -\frac{1}{2}(r+2t+1) + \frac{t}{r} \leq \mu(x) < -\frac{1}{2}r - t \\ -\frac{r}{r+2t}\mu(x) & -\frac{1}{2}r - t \leq \mu(x) < 0 \\ \frac{r}{r+2t}\mu(x) & 0 \leq \mu(x) < \frac{1}{2}r + t \\ \frac{r}{r-2t}\mu(x) - \frac{2rt}{r-2t} & \frac{1}{2}r + t \leq \mu(x) < \frac{1}{2}(r+2t+1) - \frac{t}{r} \\ \frac{r}{r+2t}\mu(x) + \frac{2rt}{r+2t} & \frac{1}{2}(r+2t+1) - \frac{t}{r} \leq \mu(x) \leq 1 \end{cases} \quad (3)$$

(3) 普通模糊空间的灰度化。对于普通模糊空间 $P'=(p_{ij}')$, 利用线性广义隶属变换的逆变换(式 4)把普通模糊空间 $P'=(p_{ij}')$ 变换成增强后的灰度图像空间 $I'=(I_{ij}')$ 。

$$I_{ij}' = \text{PLT}(p_{ij}') = \text{LT}^{-1}(p_{ij}') = p_{ij}' \times (I_{\max} - M) + M.$$

由此,得到线性广义模糊增强后的图像 I' 。

3.2 小波基的选取

昆虫翅膀图像中混有大量噪声,高速摄像机拍摄的图像大部分为高斯噪声。因此,需要通过验证小波函数的去高斯噪声能力来选择小波基函数。通过比较 haar 小波、bior3.7 小波、db4 小波和 sym4 小波软阈值消噪^[7-8]后图像的最小均方误差(式(4))和信噪比增量(式(5))来评价 4 种小波函数去除高斯噪声的能力。

$$\text{MSE}(\hat{f}) = \frac{100 \sum_{\forall(x,y)} [\alpha \hat{f}(x,y) - f(x,y)]^2}{\sum_{\forall(x,y)} f^2(x,y)}, \tag{4}$$

其中

$$\alpha = \frac{\sum_{\forall(x,y)} f(x,y) \hat{f}(x,y)}{\sum_{\forall(x,y)} \hat{f}^2(x,y)},$$

$$\Delta \text{SNR} = 10 \lg \frac{\sum_{\forall(x,y)} [g(x,y) - f(x,y)]^2}{\sum_{\forall(x,y)} [\hat{f}(x,y) - f(x,y)]^2}. \tag{5}$$

由表 1 可知,应用 bior3.7 小波对含噪 woman 图像进行软阈值去噪后,图像最小均方误差值最小,拥有最大的信噪比增量。由此判定, bior3.7 小波具有较好的去除高斯噪声的能力,所以采用 bior3.7 小波处理图像。

表 1 应用不同小波函数软阈值去噪结果比较

Tab.1 Comparison of different wavelet soft threshold denoising results

	Haar	Bior3.7	Db4	Sym4
MSE	4.483	3.254	3.784	3.746
DSNR	-1.142	2.016	0.509	0.606

3.3 增强算法流程

采用小波同态滤波和双线性广义模糊相结合的算法增强翅脉图像,增强算法流程如图 5。

小波消噪环节,采用 bior3.7 小波对图像进行 2 层小波分解,对各层的高频小波系数采用

matlab 小波工具箱中 ddencmp 函数获取的默认阈值进行软阈值处理。

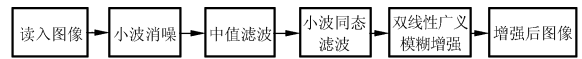


图 5 翅脉图像增强算法流程图

Fig.5 Flow chart of image enhancement for wing vein

在小波同态滤波环节中,算法的参数设置为: $r_1=1.2, r_2=2.3, k_c=1/8$, 选取 bior3.7 小波函数,小波分解层数为 3 层。

广义模糊增强环节中, $M=90, r=3/4, t=1/3$ 。

4 翅脉中心点和翅脉交叉点的亚像素级提取

4.1 翅脉中心点提取

由 2.2 节可知,翅脉中心点即为灰度函数一阶导的过零点和二阶导的正极值的点,可采用基于 Hession 矩阵的亚像素条纹中心提取算法提取翅脉中心点的位置,其二阶梯度极值取海森矩阵特征值的正极值,沿暗线条方向对翅脉中心点进行连接得到完整的翅脉中心线。

4.2 翅脉交叉点提取

交叉点是两条或两条以上翅脉的交点,在进行翅脉连接时通过判断当前翅脉中心点是否同为两条翅脉上的点来确定交叉点,但由于受噪声影响,翅脉交叉点附近灰度分布复杂,不可避免会产生虚假交叉点。为此采用邻域角度约束方法来剔除虚假交叉点:由于翅脉的连续性,当前翅脉中心点的八邻域内至少有一个后继点,但由于翅脉中心点为亚像素级,有时在其八邻域内会存在两个后继点;对于翅脉交叉点,其八邻域内必然会有两个后继点。

从图 6 可看出,由于同一翅脉的方向变化是连续的,在八邻域内当前翅脉点和后继两个相邻翅脉点之间的夹角很小,而对于交叉点,由于其两个后继点分别属于不同的翅脉,方向发生较大变化,其与两个后继点之间的夹角较大,因此可利用八邻域内翅脉中心点之间的角度变化作为约束条件来剔除虚假交叉点。如图 6(a)和 6(b)所示, p_i 为当前翅脉点, p_{j_1} 和 p_{j_2} 分别为其亚像素位置

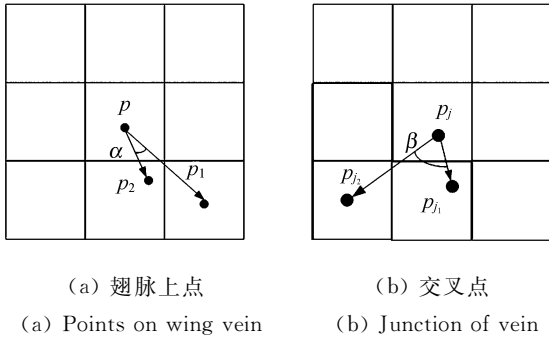


图 6 交叉点的邻域角度约束

Fig. 6 Neighbouring angle constraints of junctions

的后继点,分别用两点的矢量 $p_j p_{j_1}$, $p_j p_{j_2}$ 和 pp_1 , pp_2 近似翅脉在该点的方向。则其夹角表示为:

$$\alpha = \arccos(\mathbf{pp}_1, \mathbf{pp}_2), \beta = \arccos(\mathbf{p}_j \mathbf{p}_{j_1}, \mathbf{p}_j \mathbf{p}_{j_2})$$

因此对于每一个交叉点,如果其与后继点之间的夹角很小,如图 6(a)所示,则当前点不是交叉点;如果夹角较大,如图 6(b)所示,即可确定当前点是交叉点。利用邻域角度约束,有效地剔除了虚假的交叉点。

5 实验结果与分析

5.1 图像增强结果

原始图 1 经上述增强算法增强后如图 7 所示。

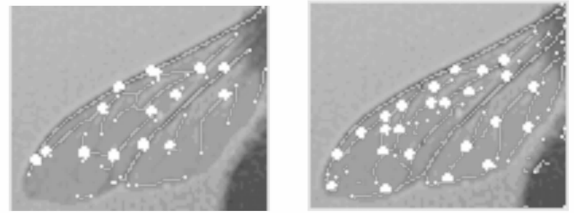


图 7 图像增强结果

Fig. 7 Result of image enhancement

5.2 翅脉和翅脉交点提取结果比较

将增强后的图像(图 7)用本文 4.1、4.2 节的算法进行翅脉中心点和交叉点提取的结果(图 8(b))与未经增强图像的提取结果(图 8(a))进行了比较,可以看出,本文所采用的先增强再应用基于 Hessian 矩阵的亚像素提取算法提取翅脉中心点比采用 4.2 节的翅脉交叉点提取的翅脉中心点效果更好。翅脉中心线条连接性更强,提取到了更多的翅脉和翅脉交点,且具有较高的定位精度,去除了噪声和干扰。



(a) 直接提取 (b) 增强后提取
(a) Direct extraction (b) Extraction after enhancement

图 8 翅脉提取结果比较

Fig. 8 Comparison of extraction results for wing veins

6 结论

本文通过全面分析立体视觉测量系统拍摄的昆虫翅脉图像的特点和截面灰度分布数学模型,先采用小波同态滤波和双线性广义模糊相结合的算法增强图像,再应用基于 Hessian 矩阵的亚像素提取算法提取亚像素级的翅脉中心点,并根据翅脉方向变化的连续性提出了邻域角度约束方法和邻域搜索算法来确定翅脉交叉点,得出了一种十分有效的翅脉中心点和翅脉交叉点的提取算法。本算法在翅脉信号十分微弱的情况下仍能对其进行有效识别,使翅脉中心点的线条连接性更强,提取到更多的翅脉交叉点。但是,由于增强翅脉的同时部分噪声也得到了增强,最后的提取结果中仍存在一些虚假交叉点,因此算法需要进一步改进。

参考文献:

- [1] ZENG L J, HAO Q, KAWACHI K. A scanning projected line method for measuring a beating bumblebee wing[J]. *Optics Communications*, 2000, 183(1): 37-43.
- [2] SONG D Q, ZENG L J, YIN CH Y. Using multi-exposure of color fringes to measure the beating notion of a moth

- [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2002,38(6):417-423.
- [3] STEGER C. *Unbiased extraction of curvilinear structures from 2D and 3D images*[D]. German: Technische Universität München,1998.
- [4] 王颖,张广军,陈大志. 昆虫翅膀图像特征的亚像素级提取方法[J]. 北京航空航天大学学报,2005, 31(8):839-842.
WANG Y,ZHANG G J,CHEN D ZH. Extraction of subpixel insect wing features in images[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2005, 31(8):839-842. (in Chinese)
- [5] 凌毓涛,姚远,曾竞. 基于小波的医学图像自适应增强[J]. 华中师范大学学报,2004, 38(1) :47-51.
LING Y T,YAO Y ,ZENG J. Wavelet based adaptive enhancement for medical image[J]. *Journal of Central China Normal University*, 2004, 38(1) :47-51. (in Chinese)
- [6] 彭东亮,吴铁军. 一种广义的图像模糊增强算法[J]. 模式识别与人工智能,2003,16(3):338-341.
PENG D L,WU T J. A generalized fuzzy enhancement algorithm for image enhancement[J]. *PR & AI*, 2003,16(3): 338-341. (in Chinese)
- [7] 谢杰成,张大力,徐文立. 小波图像去噪综述[J]. 中国图像图形学报,2002,7(3):209-216.
XIE J CH,ZHANG D L,XU W L. Overview on wavelet image denoising [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2002,7(3):209-216. (in Chinese)
- [8] 方勇华,孔超,兰天鸽,等. 应用小波变换实现光谱的噪声去除和基线校正[J]. 光学精密工程,2006,14(6):1088-1093.
FANG Y H,KONG CH,LAN T G,*et al.*. Denoising and baseline correction of spectrum wavelet transform[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(6):1088-1093. (in Chinese)

作者简介:江 洁(1973—),女,福建人,北京航空航天大学博士,副教授,主要从事光电信息处理和光电导航的研究。E-mail:jiangjie@buaa.edu.cn