

# 基于单元最邻近匹配的蝗虫切片图像修复方法\*

李丽 郭双双 梅树立 张楠楠

(中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 针对序列切片中带有褶皱的蝗虫切片图像, 提出基于单元最邻近匹配的方法打开褶皱, 首先利用尺度不变特征变换 (Scale-invariant feature transform, SIFT) 算法对放大 2 倍的切片图像提取褶皱切片和参考切片特征点, 利用  $k-d$  树策略确定初始的匹配对; 然后经 RANSAC 算法剔除误匹配; 再分别对褶皱区域和褶皱切片进行单元划分, 并用最小二乘法分别求每个褶皱子单元最邻近的切片子单元中匹配点对的空间映射模型; 最后利用该空间映射模型求褶皱子单元的对应匹配块, 完成褶皱区域的修复。试验表明: 采用单元最邻近匹配的方法能够搜索到更多的特征点, 建立的空间映射模型也能更好地匹配褶皱区域的图像纹理变化, 能较好地完成对褶皱区域的修复, 实现带破损切片的精确分割和修复。

**关键词:** 蝗虫切片 褶皱 图像修复 单元最邻近匹配 尺度不变特征变换算法

**中图分类号:** TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)08-0015-05

## Image Restoration of Locust Slices Based on Nearest Unit Matching

Li Li Guo Shuangshuang Mei Shuli Zhang Nannan

(College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The stored microscopic images of locust slices often turn out to be folded owing to improper operations during experiments. As these images cannot be reproduced in practice, it is necessary to restore the images of the folded slices to accurately reflect the original biological tissues of the locusts. The nearest unit matching method was used to restore the damaged images of locust slices. A sequence of images of slices was first magnified by a factor of two to extract the feature points from the folded slices and the reference slices using SIFT (Scale-invariant feature transform) algorithm. The initial matching pairs were determined using the  $k-d$  tree strategy and the incorrect matching pairs were eliminated using RANSAC (Random sample consensus) algorithm. The folded area and the rest of the image were then divided into sub-cells respectively. By comparing the number of matched pairs near the folded sub-cell, the matching sub-cells in the image were determined. The space mapping model was established between matching pairs associated with the nearest slice sub-cell of each folded sub-cell by using the least square method. The matching blocks within the reference slice of the folded sub-cell were selected based on the space mapping model. The method was tested by using different locust slices compared with the traditional image restoration methods. Then the common image restoration evaluating indicators were used, such as the peak signal to noise ratio and the mean square error to compare and evaluate the image restoration results. The experimental results showed that the method yielded more feature points and the established space mapping model could better adapt to various veins of the slices with accurate segmentation and restoration of images of damaged slices.

**Key words:** Locust slices Folds Image restoration Nearest unit matching Scale-invariant feature transform algorithm

收稿日期: 2015-03-09 修回日期: 2015-05-18

\* 国家自然科学基金资助项目(41171337)

作者简介: 李丽, 教授, 博士, 主要从事计算机图形图像处理技术研究, E-mail: lili.li@cau.edu.cn

## 引言

蝗虫对农作物具有毁灭性的破坏作用,其在高温和干旱条件下的大量繁殖严重影响农作物的生长<sup>[1]</sup>。蝗虫显微切片试验的主要目的是认识蝗虫细胞及神经构造,揭示蝗虫繁殖及农药除虫的作用机理,辅助生物农药的研制和开发,减少化学农药的污染。蝗虫切片在传输和保存过程中不可避免地会出现一些褶皱,造成图像缺损。个体生物组织的切片无法重复获取,因此需要对褶皱的蝗虫切片图像进行精准修复。

在众多图像修复方法<sup>[2]</sup>中,应用较多是全变差(Total variation, TV)模型<sup>[3]</sup>。由于以图像残存区域的梯度填充破损区域的方法存在局限性,全变差模型被不断改进。Tsai<sup>[4]</sup>等提出了利用差值对图像进行修复的Munford-Shah模型,但该模型在修补大尺度图像时也存在不足。随后Criminisi等<sup>[5]</sup>提出了类似学习字典的样例方法,将扩散单位由像素变为图像块,在修复较大区域破损时获得明显优势。与基于灰度相关的图像匹配算法相比,基于特征提取的匹配算法(如SIFT算法)能在图像灰度、位置角度、尺度变化后保持较好的鲁棒性,近年来被广泛应用于图像处理各领域<sup>[6-10]</sup>。

本文以带有褶皱的蝗虫切片图像为研究对象,针对传统特征提取算法没有考虑局部区域变化因素,且计算量大的局限性<sup>[11]</sup>,结合特征点提取方法及有限元思想对褶皱区域图像进行单元匹配,以此为突破点提高切片配准率、修复质量及算法的运行效率,为进行蝗虫体地图重建提供技术支持。

## 1 图像匹配及基于单元最邻近匹配图像修复算法

选择蝗虫切片灰度图像作为待修复图像和参考图像,采用SIFT和随机采样一致(Random sample consensus, RANSAC)的思想<sup>[12]</sup>对切片进行特征点的提取和匹配,之后分别对待修复切片和褶皱区域进行单元划分,并构建子单元的空间映射模型,最后实现图像的匹配和褶皱的修复。其流程如图1所示。

### 1.1 图像匹配及特征点的提取

配准是通过匹配及对比建立参考切片图像与待修复图像对应点的映射关系。特征点提取应用SIFT算法,它是一种基于尺度空间,且使图像的缩放、旋转以及仿射变换都能保持不变性的图像局部特征描述算子<sup>[13-14]</sup>,它通过在不同的尺度空间上查找特征点,并对关键点附加描述器,最后将得到的具有方向、尺度等信息的关键点进行两两比较找出互相匹配的特征点对,从而建立图像之间的映射关系。

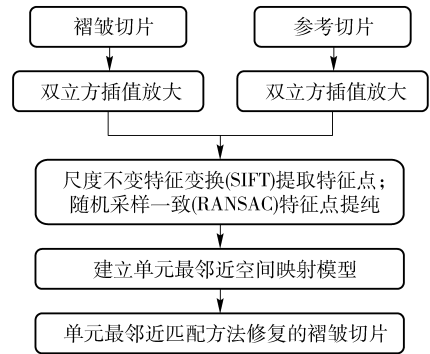


图1 单元最邻近方法流程图

Fig. 1 Flow chart of nearest unit matching method

### 1.1.1 高斯差分提取特征点

高斯核是唯一可以产生多尺度空间的核,而高斯差分算子(Difference of Gaussian, DoG)只需将相邻尺度高斯平滑后的图像相减,计算较为简单<sup>[15]</sup>,因此SIFT采用DoG算子建立DoG金字塔来进行关键点的检测。DoG函数的定义为

$$D(x, y, \sigma) = [G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)]I(x, y) = L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma) \quad (1)$$

式中 $k$ 为常数,根据Lowe的研究<sup>[16]</sup>,为了保证极值检测和定位的稳定性, $k$ 一般取值为 $2^{\frac{1}{n}}$ , $n$ 为金字塔层数; $I(x, y)$ 为原切片图像; $G(x, y, \sigma)$ 为一个尺度可变的二维高斯函数,原切片图像与高斯函数做卷积运算得到该切片的尺度空间 $L(x, y, \sigma)$ ; $\sigma$ 为图像的尺度,其初始值定义为

$$\sigma_0 = \sqrt{\sigma_{init}^2 - \sigma_{pre}^2} \quad (2)$$

式中 $\sigma_{init}$ 为第0层的尺度; $\sigma_{pre}$ 为切片经显微镜模糊后的尺度,也即试验切片本身的尺度。根据Lowe的成果<sup>[16]</sup>,将 $\sigma_{init}$ 定义为1.6即可保证接近最优的可重复性;将 $\sigma_{pre}$ 定义为0.5,能防止明显的锯齿效应的最小值。则图像金字塔第0层的实际尺度 $\sigma_0$ 就确定为1.52。图2a给出了当 $\sigma$ 为1.52, $k$ 取 $\sqrt{2}$ 时的蝗虫切片DoG结果。用点标记DoG的极值点,则可得到图2b所示的角点检测结果,其中黑色点即检测到的角点。

### 1.1.2 关键点方向确定及描述

利用DoG函数求极值点,使其具有缩放不变性,为了消除旋转对切片的影响,需要确定关键点的方向并对其进行描述。

根据直方图统计方法,计算以关键点为中心,半径为 $3 \times 1.5\sigma$ 区域内的关键点梯度,以每 $10^\circ$ 为一个柱生成方向直方图,并对方向直方图进行2次平滑后,其主峰值即为特征点的方向。记录关键点及其周围对其有贡献的点的方向、尺度及大小作为对关键点的描述信息。首先以特征点为中心确定一个 $16 \times 16$ 的单元,以 $4 \times 4$ 为单位计算8个方向的梯

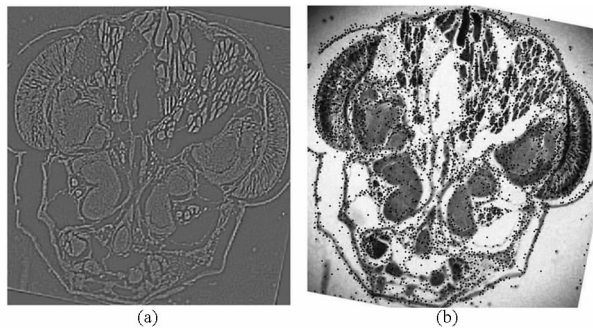


图 2 蝗虫切片的 DoG 图及角点检测结果图

Fig. 2 DoG and corner detection results of locust slice

(a)  $\sigma = 1.52$ , 蝗虫切片 DoG 结果 (b) 蝗虫切片角点检测结果

度直方图, 最终形成  $4 \times 4 \times 8$  维的特征描述向量。

## 1.2 基于单元最邻近匹配图像修复

### 1.2.1 有限元思想

有限元方法是把计算域离散分为有限个互不重叠且相互连接的单元, 在每个单元内选择基函数, 用单元基函数的线性组合来逼近单元中的真解, 整个计算域上总体的基函数可以看为由每个单元基函数组成, 则整个计算域内的解可以看作是由所有单元上的近似解构成。最小二乘法就是有限元方法的一个典型的扩展。

基于有限元的原理及思想, 提出单元最邻近匹配图像修复方法, 对蝗虫切片及褶皱部分进行单元匹配, 选取褶皱单元最邻近的切片单元建立空间映射模型, 从而在一定程度上减小由局部褶皱形变造成的匹配误差。

### 1.2.2 空间映射模型

求得正确的匹配对后, 构建单应性矩阵求对应特征点的映射关系。单应性矩阵定义了 2 幅图像之间的一一对应关系。为了充分利用 RANSAC 后的匹配对, 采用最小二乘法求解该空间对应模型<sup>[17]</sup>。单应性矩阵的表示及褶皱切片与参考切片图像特征点之间的映射关系为

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \\ h_4 & h_5 & h_6 \\ h_7 & h_8 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$x_b = \frac{h_1 x_a + h_2 y_a + h_3}{h_7 x_a + h_8 y_a + 1} \quad (4)$$

$$y_b = \frac{h_4 x_a + h_5 y_a + h_6}{h_7 x_a + h_8 y_a + 1} \quad (5)$$

### 1.2.3 单元最邻近方法

为了更好地利用褶皱部分图像的局部特征, 根据有限元思想将褶皱区域的图像划分成  $s \times t$  的子单元, 并将褶皱切片的图像划分为  $n \times n$  的子单元, 针对褶皱划分的第 block  $(i, j)$  个子单元, 记录其所在的切片子单元的位置  $\text{loc}[m, 2]$ , 并读取其中的特征点。其中  $m$  为 block  $(i, j)$  所在的子单元个数。

图 3a 所示为将褶皱切片分成  $4 \times 4$  的子单元, 图 3b 为将褶皱区域分成  $5 \times 2$  子单元的示意图; 然后利用选取的特征点用最小二乘法求取空间对应模型, 最后利用该区域对应模型对褶皱部分蝗虫图像进行修复。

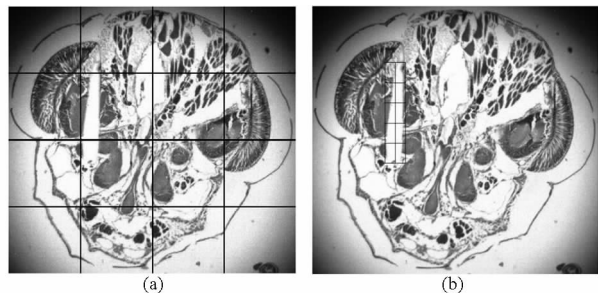


图 3 褶皱切片单元划分示意图

Fig. 3 Sketch maps of partitioning on folded slices

(a) 蝗虫切片整体划分图 (b) 蝗虫切片褶皱区域划分图

## 2 试验验证及修复效果分析

### 2.1 试验验证

随机选取生物显微镜下获取的 5 组不同光照、角度下的蝗虫切片图像进行破损区域的修复。

根据单元最邻近算法流程图(图 1), 首先采用双立方插值算法将蝗虫切片放大 2 倍, 由于扩大后的像素信息来自 16 个邻近点的权重卷积之和, 所以能够得到较为细致的切片图, 并且能够提取更多的特征点, 如表 1 所示。为了方便对切片图进行修复, 试验预处理中将切片褶皱部分标记为黑色矩形区域。之前的试验已经证明对于蝗虫切片来说, SIFT 算法能够得到更多的特征点<sup>[18]</sup>, 为此, 本试验仍然采用 SIFT 算法对切片进行特征提取。

表 1 传统匹配方法与单元最邻近匹配方法中提取的特征点数对比

Tab. 1 Comparison between traditional method and nearest unit matching method in terms of numbers

方法	组别				
	1	2	3	4	5
传统匹配	544	1 641	150	482	1 669
单元最邻近匹配	1 548	1 734	154	487	1 815

SIFT 算法基本确定了匹配的特征点对, 后用单元最邻近方法对切片进行褶皱打开。以第 1 组试验图像为例, 由于所选取的带有褶皱蝗虫切片图像中褶皱区域较为狭窄, 所以最终确定褶皱区域分为  $1 \times 4$  的子单元, 每个子单元区域匹配结果如图 4a ~ 4d 所示, TV 方法与单元最邻近方法的最终修复效果如图 4e、4f 所示。图 4a ~ 4d 中的黑色块是图像的待修复区域, 直线是与初始匹配点连接线, 图 4e、4f 中的矩形框内是修复区域。使用本文提出的方法对其

他 4 组蝗虫横向和纵向切片灰度试验图像进行修复,将褶皱区域做同样的预处理,并将其划分为  $1 \times 4$  或  $4 \times 1$  的子单元。由于褶皱造成了褶皱区域周

围图像的偏移,未分块的修复区域仍不能很好地与周围像素融合,而单元最邻近修复在一定程度上融合了周围像素。

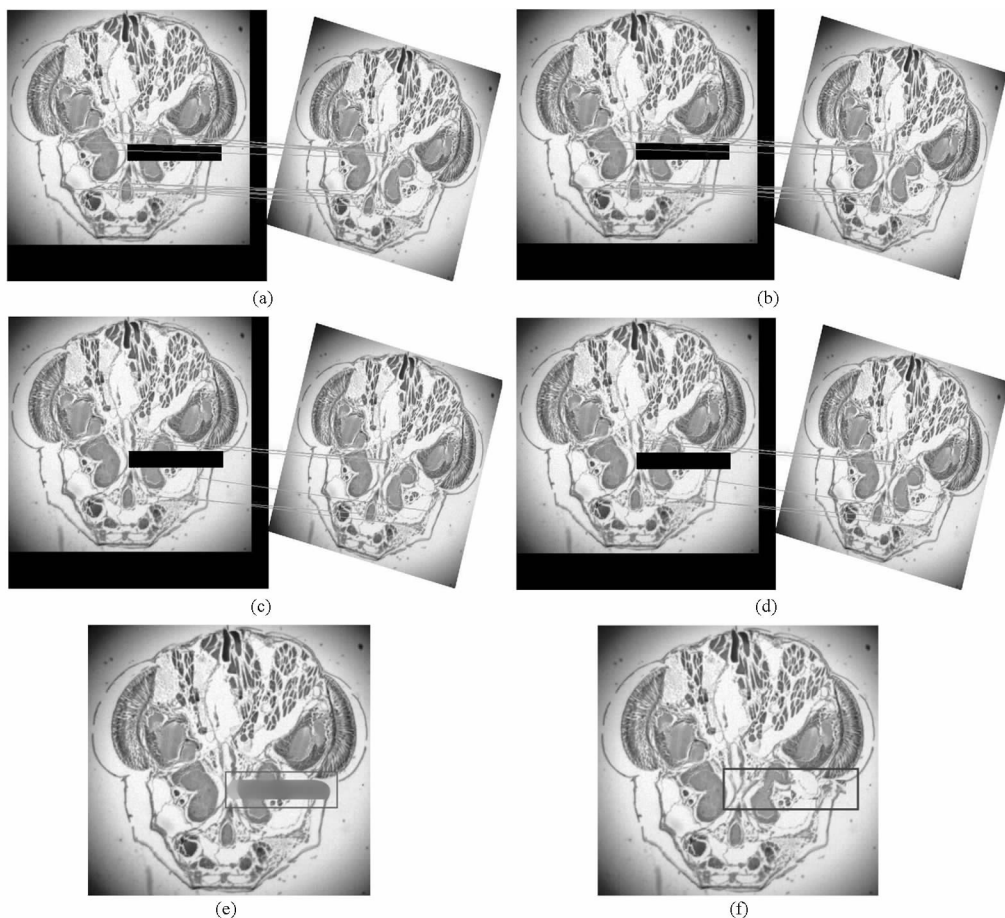


图 4 蝗虫横向灰度脑切片图修复试验结果

Fig. 4 Results of horizontal gray locust brain slice repairing experiment

(a) 第 1 个子单元匹配结果 (b) 第 2 个子单元匹配结果 (c) 第 3 个子单元匹配结果 (d) 第 4 个子单元匹配结果  
(e) TV 修复方法对蝗虫横向灰度脑切片图修复效果 (f) 单元最邻近修复方法对蝗虫横向灰度脑切片图修复效果

## 2.2 算法修复效果评价

采用目前应用较多的全参考评价方法评价图像修复效果,评价指标包括峰值信噪比测度 (PSNR)<sup>[19]</sup> 和均方差测度 (MSE)<sup>[20]</sup>。

针对一幅  $M \times N$  的灰度图像  $I(x, y)$ , 假设其修复后的图像为  $I_0(x, y)$ , 峰值信噪比测度、均方差测度分别定义为

$$R_{PSNR} = 10 \lg \frac{255 \times 255}{\frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (I(x, y) - I_0(x, y))^2} \quad (6)$$

$$R_{MSE} = \frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (I(x, y) - I_0(x, y))^2 \quad (7)$$

采用峰值信噪比测度和均方差测度标准对试验所用 5 组图像的修复效果进行评价, PSNR 的值越大, MSE 的值越小, 代表图像的失真越小。其评价结果如表 2 所示, 可以看出单元最邻近修复算法较

TV 修复算法具有更好的修复效果, 并且从修复的轮廓中可以看出, 单元最邻近修复方法能更好地保持图像的轮廓, 更接近纹理优先的修复。

表 2 TV 图像修复方法与单元最邻近匹配方法对比  
Tab. 2 Comparison between total variation based image restoration method and nearest unit matching method

组别	TV 图像修复方法		单元最邻近匹配修复方法	
	PSNR/dB	MSE	PSNR/dB	MSE
1	26.452 4	147.177 1	31.433 3	46.747 0
2	27.226 1	123.161 2	29.858 8	67.173 6
3	29.716 5	69.411 5	31.820 6	42.757 9
4	28.826 2	85.204 1	31.703 1	43.930 8
5	20.866 7	532.605 7	29.920 5	66.226 2

## 3 结论

(1) 利用双立方插值算法将切片图像放大 2 倍, 再利用特征提取算法搜寻特征点, 试验表明, 扩大后

蝗虫切片图像比原图像能搜寻到更多的特征点。

(2) 利用有限元思想构建蝗虫切片图像单元最邻近匹配修复模型, 并对蝗虫切片图像和褶皱区域图像分别进行子单元的匹配, 5 组褶皱切片图像修复试验表明: 本文提出的单元最邻近方法的峰值信噪比比 TV 方法略大, 但均方差更小, 因此其具有更

好的特征匹配和图像修复效果。

(3) 对褶皱蝗虫切片图像进行修复, 能在一定程度上达到纹理连续的修复效果, 但当褶皱区域或周围区域存在较大形变和移位时, 会导致图像的修复仍然稍有不连贯, 尚需进一步研究基于纹理优先的蝗虫切片修复方法。

### 参 考 文 献

- 1 毛文华, 郑永军, 苑严伟, 等. 基于色度和形态特征的蝗虫信息提取技术[J]. 农业机械学报, 2008, 39(9): 104 - 107.  
Mao Wenhua, Zheng Yongjun, Yuan Yanwei, et al. Locust information extraction using hue and shape feature[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(9): 104 - 107. (in Chinese)
- 2 陈玉, 赵德安. 基于 LBM 的苹果采摘机器人视觉图像自动修复算法[J]. 农业机械学报, 2010, 41(11): 153 - 157.  
Chen Yu, Zhao Dean. Automatic image inpainting algorithm for apple harvesting robot's vision system based on LBM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11): 153 - 157. (in Chinese)
- 3 Bachmayr M, Burger M. Iterative total variation schemes for nonlinear inverse problems[J]. Inverse Problems, 2009, 25(10): 105004.
- 4 Tsai A, Jr Yezzi A, Willsky S A. Curve evolution implementation of the Mumford - Shah functional for image segmentation, denoising, interpolation and magnification[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(8): 1169 - 1186.
- 5 Criminisi A, Perez P, Toyama K. Object removal by exemplar-based inpainting[C] // Proceedings of the 2003 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2003, 2: 721 - 728.
- 6 周博, 郑加强, 周宏平. 树木图像拼接系统特征点匹配[J]. 农业机械学报, 2010, 41(10): 195 - 198.  
Zhou Bo, Zheng Jiaqiang, Zhou Hongping. Tree image mosaicing system based on featured area matching[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 195 - 198. (in Chinese)
- 7 张凯, 耿长兴, 张二鹏, 等. 温室环境下红掌图像拼接算法[J]. 农业机械学报, 2013, 44(4): 223 - 227.  
Zhang Kai, Geng Changxing, Zhang Erpeng, et al. Anthurium image mosaicing algorithm in greenhouse environment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 223 - 227. (in Chinese)
- 8 Liu Yiming, Chen Lifang, Liu Yuan. An image matching algorithm based on SIFT and improved LTP [C] // 2013 Ninth International Conference on Computational Intelligence and Security (CIS), 2013: 432 - 436.
- 9 Wang Bingjie, Liang Wei, Wang Yucheng, et al. Head pose estimation with combined 2D SIFT and 3D HOG features[C] // 2013 Seventh International Conference on Image and Graphics (ICIG), 2013: 650 - 655.
- 10 Ali Elqursh, Ahmed Elgammal. Line-based relative pose estimation[C] // 2011 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2011: 3049 - 3056.
- 11 Chiang M C, Boulton T E. Efficient image warping and super-resolution[C] // IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (WACV96), 1996: 56 - 61.
- 12 王传宇, 郭新宇, 吴升, 等. 基于计算机视觉的玉米果穗三维重建方法[J]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 274 - 279.  
Wang Chuanyu, Guo Xinyu, Wu Sheng, et al. Three dimensional reconstruction of maize ear based on computer vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 274 - 279. (in Chinese)
- 13 杜杰, 刘亚秋, 孙焱. 基于仿射不变闭合区域和 SURF 的图像匹配算法[J]. 计算机应用研究, 2014, 31(1): 295 - 298.
- 14 杨艳伟. 基于 SIFT 特征点的图像拼接技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.  
Yang Yanwei. Research on image mosaic based on SIFT feature points[D]. Xi'an: Xidian University, 2009. (in Chinese)
- 15 Schmid C, Mohr R, Bauckhage C. Comparing and evaluating interest points[C] // 1998 International Conference on Computer Vision, 1998: 230 - 235.
- 16 David G Lowe. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91 - 110.
- 17 马晓丹, 刘刚, 冯娟, 等. 成熟期苹果树冠层器官异源图像配准[J]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 82 - 88.  
Ma Xiaodan, Liu Gang, Feng Juan, et al. Multi-source image registration for canopy organ of apple trees in mature period[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 82 - 88. (in Chinese)
- 18 李丽, 郭双双, 梅树立, 等. 基于特征点提取匹配的蝗虫切片图像的拼接和修复方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 157 - 165.  
Li Li, Guo Shuangshuang, Mei Shuli, et al. Mosaic and repair method of locust slices based on feature extraction and matching[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(7): 157 - 165. (in Chinese)
- 19 陆明洲, 沈明霞, 刘志强, 等. WMSN 节点的低内存开销图像压缩方法[J]. 农业机械学报, 2014, 45(11): 292 - 297.  
Lu Mingzhou, Shen Mingxia, Liu Zhiqiang, et al. Image compression method with low memory cost on sensor nodes of WMSN[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 292 - 297. (in Chinese)
- 20 黄双萍, 洪添胜, 岳学军, 等. 基于高光谱的柑橘叶片磷含量估算模型实验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(4): 202 - 207, 195.  
Huang Shuangping, Hong Tiansheng, Yue Xuejun, et al. Hyperspectral estimation model of total phosphorus content for citrus leaves[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 202 - 207, 195. (in Chinese)