

数学形态学在作物病害图像处理中的应用研究

刁智华¹⁾ 赵春江²⁾ 吴刚¹⁾ 郭新宇²⁾

¹⁾(中国科学技术大学自动化系, 合肥 230027) ²⁾(国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097)

摘要 作为一种 2 维卷积运算的非线性图像处理方法, 数学形态学的内容包括二值形态学、灰度形态学和彩色形态学。膨胀、腐蚀、开运算、闭运算是数学形态学的基础。数学形态学可用于噪声去除、边缘检测、图像分割、特征提取等图像处理问题, 在图像处理领域得到了越来越广泛的应用。结合目前的研究进展, 对数学形态学的分类及其在作物病害图像处理中的应用进行综合性阐述, 并对数学形态学目前存在的问题以及未来的发展方向进行了讨论。

关键词 数学形态学 腐蚀 膨胀 作物病害 图像处理

中图分类号: TP391.4 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2010)02-0194-06

Application Research of Mathematical Morphology in Image Processing of Crop Disease

DIAO Zhīhua¹⁾, ZHAO Chun-jiang²⁾, WU Gang¹⁾, GUO Xin-yu²⁾

¹⁾(Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027)

²⁾(National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097)

Abstract As a non-linear image processing method with two-dimensional convolution operation, mathematical morphology is divided into binary morphology, gray-level morphology and color morphology. Erosion, dilation, opening operation and closing operation are the basis of mathematical morphology. Mathematical morphology can be used for edge detection, image segmentation, noise elimination, feature extraction and other image processing problems. It has been widely used in the field of image processing. Based on current progress, this paper gives a comprehensive expatiation on the mathematical morphology classification and application of image processing of crop disease. In the end, open problems and further research of mathematical morphology are discussed.

Keywords mathematical morphology, erosion, dilation, crop disease, image processing

0 引言

作为一种用于数字图像处理和识别的新理论和新方法, 数学形态学的数学基础和所用语言是集合论, 具有完备的数学基础。数学形态学诞生于 1964 年, 是由法国巴黎矿业学院博士生 Serra 和导师 Matheron 在从事铁矿核的定量岩石学分析及预测其

开采价值的研究中提出“击中/击不中变换”, 并在理论层面上第一次引入了形态学的表达式, 建立了颗粒分析方法。1968 年, 他们又在法国建立了“枫丹白露数学形态学研究中心”, 在该中心的学者和其他各国研究人员的共同努力下, 数学形态学得到了不断丰富和完善。20 世纪 70 年代, 数学形态学重点在灰度方面得到发展。1982 年, 专著《图像分析与数学形态学》问世后, 形态学走向美国及世界。

基金项目: 北京市自然科学基金项目 (4062015)

收稿日期: 2008-09-24 改回日期: 2008-12-15

第一作者简介: 刁智华 (1982—), 男。中国科学技术大学控制理论与控制工程专业博士研究生。主要研究方向为图像处理、模式识别。Email: dzhua@mail.ustc.edu.cn

随后, 数学形态学得到蓬勃发展。由于数学形态学的算法具有天然的并行实现结构, 实现了形态学分析和处理算法的并行, 易于硬件实现, 大大提高了图像分析和处理的速度, 已引起了人们的广泛关注。

数学形态学作为一门建立在严格数学理论基础上的学科, 其基本思想和方法对图像处理的理论和技术产生了重大影响, 目前已经应用在多门学科的数字图像分析和处理的过程中。不仅如此, 数学形态学应用于农业领域也取得了很大进展, 在图像处理的很多阶段都有应用。应用的重点方面是作物病害的识别, 包括小麦、棉花、蔬菜等。

1 数学形态学分类

数学形态学最初仅应用于二值图像, 后来经过努力, 借助于伞理论, 将其推广到灰度图像, 使灰度形态学的理论和应用研究也得到很大的发展。近期, 人们对数学形态学的研究重点放在彩色图像上, 并取得了一些成果。本文针对形态学研究对象的表达或显示形式, 将数学形态学分为二值形态学、灰度形态学和彩色形态学。

1.1 二值形态学^[1]

最初, 由 Matheron 和 Serra 提出的数学形态学研究以二值图像为对象, 称为二值形态学。数学形态学中二值图像的形态变换是一种针对集合的处理过程。其形态算子的实质是表达物体或形状集合与结构元素间的相互作用, 结构元素的形状就决定了这种运算所提取的信号形状信息。形态学图像处理是在图像中移动一个结构元素, 然后将结构元素与下面的二值图像进行交、并等集合运算。基本的形态运算是腐蚀和膨胀。

在形态学运算中, 结构元素是最重要最基本的概念, 它的作用相当于在信号处理中的“滤波窗口”的功能。用 $B(x)$ 代表结构元素, 对工作空间 E 中的每一点 x , 腐蚀和膨胀的定义分别为:

$$\text{腐蚀: } X = E \ominus B = \{x: B(x) \subset E\} \quad (1)$$

$$\text{膨胀: } Y = E \oplus B = \{y: B(y) \cap E \neq \emptyset\} \quad (2)$$

用 $B(x)$ 对 E 进行腐蚀的结果就是把结构元素 B 平移后使 B 包含于 E 的所有点构成的集合。用 $B(x)$ 对 E 进行膨胀的结果就是把结构元素 B 平移后使 B 与 E 的交集非空的点构成的集合。如果结构元素为一个圆盘, 那么膨胀可填充图像中的小孔(比结构元素小的孔洞)及图像边缘处的小凹陷部

分, 而腐蚀可以消除图像边缘小的成分, 并将图像缩小, 从而使其补集扩大。开运算就是先腐蚀后膨胀的过程, 它具有消除细小物体, 在纤细处分离物体和平滑较大物体边界的作用。而闭运算则为先膨胀后腐蚀的过程, 它具有填充物体内部细小空洞, 连接邻近物体和平滑边界的作用。

由定义和数学表述可知, 二值形态膨胀与腐蚀可转化为集合的逻辑运算, 算法简单。由于适于并行处理, 且易于硬件实现, 适于对二值图像进行多种操作, 比如边缘检测、图像分割、细化、抽取骨架、边缘特征提取等。但是, 在不同的应用场合, 结构元素的选择及其相应的处理算法是不一样的, 对不同的目标图像需设计不同的结构元素和不同的处理算法。结构元素的大小、形状选择合适与否, 将直接影响图像的形态运算结果。文献[2]分别采用圆、三角形、正方形等几何基元作为结构元素, 对二值图像进行多次腐蚀, 然后采用形态模板过滤图像的分割方法将昆虫的各部位分开。结果表明, 这种分割算法能够获得较好的效果, 为进行害虫图像的形状特征提取奠定了良好基础。文献[3]在欧氏空间创立了空间变量数学形态学算子, 提出了基于空间变量的几何结构元素, 仿真结果阐明了这种理论以及在各种图像处理应用的巨大潜力。

1.2 灰度形态学^[4-5]

灰度形态学是二值形态学对灰度图像的自然扩展, 其运算对象不再是集合, 而是图像函数。在灰度形态学中, 二值形态学中所用到的交、并运算将分别用最大、最小极值运算代替。灰度图像的腐蚀和膨胀过程可直接从图像和结构元素的灰度级函数计算出来。对图像中的某一点 $f(x, y)$, 结构元素为 $g(x, y)$, 灰度形态学腐蚀和膨胀运算的定义分别为

$$\text{腐蚀: } (f \ominus g)(x, y) = \min_{ij} \{f(x-i, y-j) - g(i, j)\} \quad (3)$$

$$\text{膨胀: } (f \oplus g)(x, y) = \max_{ij} \{f(x-i, y-j) + g(i, j)\} \quad (4)$$

灰度形态膨胀即以结构元素 $g(x, y)$ 为模板, 搜寻图像在结构基元大小范围内的灰度和的极大值。腐蚀运算过程则是以结构元素 $g(x, y)$ 为模板, 搜寻图像在结构基元大小范围内的灰度差的极小值。同时, 在腐蚀运算中可以得到两种结果: 如果所有的结构元素都为正, 则输出图像将趋于比输入图像暗; 在比结构元素还小的区域中的明亮经腐蚀处理后其效果将减弱, 减弱的程度取决于环绕亮度

区域的灰度值以及结构原色自身的形状和幅值。在膨胀运算中,也可以得到两种结果:如果所有的结构元素都为正,则输出图像将趋于比输入图像亮;黑色细节减少或去除取决于在膨胀操作中结构元素相关的值和形状。灰度形态学的开闭运算和二值形态学的类似,也是先腐蚀后膨胀的过程为开运算,先膨胀后腐蚀的过程为闭运算。

为了将灰度形态学运算用于实际应用中,很多学者也提出了很多改进的算法。文献[6]针对基于经典形态学的边缘检测方法虽然具有较好的去噪能力,但不能反映全部的边缘特性的问题,给出了一种扩展的数学形态学的定义,并提出了一种基于扩展数学形态学的边缘检测方法。仿真结果表明,该方法不仅能有效地去除噪声,而且通过检测所得到的边缘图像具有良好的边缘特性。文献[7]提出了空间变量数学形态学,并给出了结构函数的几何概念。最后,仿真结果表明,该理论在图像处理和计算机视觉中具有潜在应用价值。

1.3 彩色形态学^[8]

目前对形态学在彩色图像处理的研究还不是很多,一些学者虽然提出了一些应用于彩色图像的形态学方法,但往往对彩色图像的各分量分别进行考虑,忽略了各分量之间的联系。对于彩色图像,采用描述彩色分量间联系的矢量方法来处理彩色像素,是一个有效、合理的研究途径。同时研究图像在HIS颜色空间的形态学变换,能较好地体现与灰度形态学的关联性。

对于HIS空间的彩色图像 $\{V(x); x \in X, X \subset D_V\}$,其中 D_V 是RGB彩色空间图像的定义域,关于结构元素 B 的彩色形态学腐蚀和膨胀分别为

$$\text{腐蚀: } V \ominus B = \max\{V(x+y); (x+y) \in D_V, y \in B\} \quad (5)$$

$$\text{膨胀: } V \oplus B = \min\{V(x-y); (x-y) \in D_V, y \in B\} \quad (6)$$

同时,声明在颜色矢量准则下的矢量最小最大运算为:在HIS颜色空间,约定 $I(x)$ 的优先级别最高,其次为 $S(x)$,最后是 $H(x)$ 。结合彩色膨胀和腐蚀,可得到有用的复合彩色形态学运算,其中开闭运算中的膨胀和腐蚀操作的次序不变。对于颜色空间,彩色形态学开运算与闭运算能够分别滤除图像中形状小于结构元素的亮噪声和黑噪声。

近年来,一些学者一直致力于彩色形态学方面的研究,进行了一些有益的探索。文献[9]提出了

一种基于数学形态学的边缘提取方法。该方法先对图像进行颜色预处理,再利用数学形态学对图像进行形态学梯度变换,最后通过基于统计学的边缘提取方法进行边缘提取。该方法消除了由于照明而引起的目标物体的阴影边缘,并且直接提取出目标物体的边缘轮廓,对背景噪声有很好的抑制作用。文献[10]提出了一个基于图像的数学形态学彩色向量排序方法,这种排序的引人注目的性质是彩色空间的独立性。在两步算法中定义一个经过滤波窗口的完整图像,并通过寻找哈密尔顿函数路径分析其结构来构建彩色向量的顺序,该方法可以应用在任何彩色图像中。

2 数学形态学应用

数学形态学的基本思想及方法适用于与图像处理有关的各个方面,随着计算机、图像处理、模式识别、计算机视觉等学科的发展,数学形态学目前正在蓬勃发展,应用范围越来越广。特别是在作物病害识别领域,取得了很多成果。现有的软件系统中,就有很多采用数学形态学算法编程实现。数学形态学应用的方面包括噪声去除、边缘检测、图像分割、特征提取等。

2.1 去除噪声

对图像中的噪声进行滤除是图像预处理中不可缺少的操作。将开和闭运算结合起来可构成形态学噪声滤除器。

对于二值图像,噪声表现为目标周围的噪声块和目标内部的噪声孔。用结构元素 B 对集合 A 进行开操作,就可以将目标周围的噪声块消除掉;用 B 对 A 进行闭操作,则可以将目标内部的噪声孔消除掉。但这些操作也和结构元素的选取有关,当噪声孔和噪声块比结构元素小时,可以顺利地消除噪声;当噪声孔和噪声块比结构元素大时,就不能消除噪声。文献[11]就使用了数学形态学中的腐蚀和膨胀运算来对选定的苹果图像进行形态学滤波,结构元素为一个 3×3 的结构。

对于灰度图像,噪声去除就是进行形态学平滑。实际中常用开运算消除与结构元素相比尺寸较小的亮细节,而保持图像整体灰度值和大的亮区域基本不变;用闭运算消除与结构元素相比尺寸较小的暗细节,而保持图像整体灰度值和大的暗区域基本不变。将这两种操作综合起来可达到滤除亮区和暗区

中各类噪声的效果。文献 [12] 提出了基于数学形态学的植物叶片图像的预处理方法, 并运用数学形态学中的开运算和闭运算消除图像的孤立噪声点并填补叶片内部孔洞, 得到了很好的效果。文献 [13] 先使用闭运算对油橄榄树图像进行操作, 结构元素为一个各向同性结构元素, 然后使用腐蚀运算进行操作, 能很好地去除噪声点。

对于彩色图像, 目前还没有统一的比较成熟的算法用于噪声去除。一般的方法都是用成熟的二值噪声去除或灰度噪声去除算法分别应用于彩色图像的各颜色分量或者颜色分量的组合, 然后采用融合的方式还原到彩色图像。文献 [14-15] 就采用了上述方法进行彩色图像的噪声去除。

2.2 边缘检测

数学形态学从集合的角度来刻画和分析图像, 通过一个“探针”集合(结构元素)对目标物体几何进行变换, 以突出所需信息。随着数学形态学理论的不完善和发展, 数学形态学在图像边缘检测中得到了广泛的研究与应用。与常规的图像边缘检测算法(如 Sobel 算子、Prewitt 算子等)相比, 形态学在图像边缘检测中具有独特的优势, 取得了较好的效果。形态学方法进行图像边缘检测, 算法简单, 同时能较好地保持图像的细节特征, 较好地解决边缘检测精度与抗噪声性能的协调问题。文献 [16] 先对彩色图像进行灰度处理, 然后采用数学形态学方法进行边缘检测, 结构元素采用 3×3 方形模板, 这种方法能较好地解决粮虫图像的去噪和边缘检测问题。文献 [6] 为了解决经典形态学方法不能很好反映全部边缘特性的问题, 提出了一种扩展的数学形态学的边缘检测方法。给出了距离算子的选择定义, 并把多尺度分析的概念应用到扩展形态学方法中, 结果表明, 该方法具有良好的边缘检测性能。文献 [17] 提出了一个基于模糊数学形态学的多方向边缘检测算法。在算法中, 将结构元素的多方向特征和模糊图像特征结合起来引入到数学形态学, 然后使用数学形态学检测边缘。结果表明, 该算法能成功检测边缘, 并和其他传统边缘检测算法相比具有更好的效果。文献 [15] 定义了彩色形态学膨胀和腐蚀运算, 并提出用多结构元来代替单一结构元, 取得了很好的效果。不足之处就是, 在进行运算时, 人为规定了 I S H 的运算顺序。

2.3 图像分割

在对图像的研究和应用过程中, 人们往往仅对

图像中的某些部分感兴趣。图像分割就是指把图像分成各具特性的区域并提取出感兴趣目标的技术和过程, 这里特性可以是像素的灰度、颜色、纹理等。基于数学形态学的图像分割算法是利用数学形态学变换, 把复杂目标 X 分割成一系列互不相交的简单子集 X_1, X_2, \dots, X_N 即

$$X = \sum_{i=1}^N X_i \quad (7)$$

对目标 X 的分割过程可按下面的方法完成: 首先求出 X 的最大内接“圆” X_1 , 然后将 X_1 从 X 中减去, 再求 $X - X_1$ 的最大内接“圆” X_2, \dots , 依此类推, 直到最后得到的集合是空集为止。

目前已经有学者将数学形态学用于农业病虫害图像分割, 并提出一些有效的图像分割算法。文献 [2] 提出了用形态模板过滤彩色图像进行分割的方法, 并将此方法用于储粮害虫的彩色图像分割中。结果表明, 这种分割方法能够取得较好的效果。文献 [14] 首先利用数学形态学在 3 个 2 维彩色子空间进行图像分割, 然后做 2 维直方图, 并对这 3 个 2 维直方图分别实施分水岭算法, 最后通过区域分裂与合并的方法融合这 3 个 2 维空间的图像分割结果, 得到最终的图像分割。该方法比直接在 3 维空间的分割方法既快又节约内存, 而且分割效果好。文献 [18] 使用数学形态学中的孔填充、腐蚀、膨胀、开和闭运算来提取蝴蝶兰苗期叶片的整个病变区域, 取得了很好的效果。文献 [19] 为了解决 Canny 算子的不足, 采用数学形态学算子作为分割后处理工具, 并选用圆盘作为结构元。同时为了克服结构元大小的影响, 采用逐渐增大尺寸的圆盘结构元对图像进行多次操作, 可以很方便地提取形状特征比如目标大小、圆率、矩形度、主轴长度、矩特征等。

2.4 特征提取

特征提取广义上指的是一种变换, 将处于高维空间的样本通过映射或变换的方式转换到低维空间, 达到降维的目的。在农业病害的识别中, 用到的特征大多为颜色特征、纹理特征、形状特征等。利用数学形态学不仅可以方便的提取出病害的纹理特征, 如能量、熵、惯性矩等, 还可以提取出病害的形状信息, 比如周长、面积、圆形度、长宽比等。文献 [18] 利用数学形态学方法得到蝴蝶兰苗期叶片的病变区域, 然后得到病变区域的中央坐标, 面积, 周长, 平均直径等特征。文献 [20] 利用数学形态学算

子提取棉花病害 4 种形状特征, 处理中采用的结构元素为 3×3 的方形模板。

3 存在问题及研究方向

作为纹理特征和形状特征分析和描述的有力工具, 数学形态学的发展方兴未艾, 新的方法和算法、新的应用成果层出不穷, 以数学形态学为基础的图像处理系统显示出美好的应用前景^[21]。特别是在农业病虫害智能识别方面, 近年来引起了国内外相关领域研究人员的广泛关注, 目前已经有学者将数学形态学应用于实际系统中。尽管如此, 在实际应用中还存在很多需要改善的地方。因而, 数学形态学目前存在的问题以及未来的研究方向可以归纳为以下几点:

1) 形态学运算实质上是一种 2 维卷积运算, 当采用灰度形态学、彩色形态学方法或图像维数较大时, 运算速度很慢, 因而不适合应用在具有实时处理功能的系统。

2) 结构元素的选取对形态学运算的结果有决定性的作用, 但是目前还没有一个结构元素选取的统一标准。

3) 彩色形态学理论还不是很成熟, 定义前需要有一些约定, 有待进一步充实。

4) 有待进一步将数学形态学与神经网络、小波、分形等方法结合起来, 对现有图像处理方法改进并推广。文献 [22] 将数学形态学和神经网络聚类相结合, 用于足趾形状识别, 对噪声不敏感且精度高。文献 [23] 将数学形态学与分形理论结合起来, 用于纹理图像分割的分形维数的估计, 可以在较小的时间复杂度下, 得到更为准确的估计结果。

5) 不同结构元素对形态学运算结果具有不同的影响, 基于多结构元的彩色图像处理方法是未来的研究方向之一。

因此, 如何实现灰度形态学、彩色形态学的快速算法, 制定结构元素的选择标准, 改善形态学运算的通用性, 增强形态学运算的适应性, 并结合数学形态学的最新应用进展, 将其应用到农业病害识别领域, 丰富和发展数学形态学的图像处理与分析方法, 成为数学形态学今后的发展方向。

参考文献 (References)

- [1] Wang Shu-wen, Yan Cheng-xin, Zhang Tian-xu, et al. Application of mathematical morphology in image processing [J]. Computer Engineering and Application, 2004 (32): 89-92 [王树文, 阎成新, 张天序等. 数学形态学在图像处理中的应用 [J]. 计算机工程与应用, 2004 (32): 89-92]
- [2] Huang Xiaoyan, Guo Yong, Zhao Taifei. Segmentation method based on mathematical morphology for colorized digital image of worm in in cropper foodstuff [J]. Computer Measurement & Control, 2003, 11(6): 467-469 [黄小燕, 郭勇, 赵太飞. 数学形态学的储粮害虫彩色数字图像分割 [J]. 计算机测量与控制, 2003, 11(6): 467-469]
- [3] Nidhal Bouaynaya, Mohammed CharifChefchaouni, Dan Schonfeld. Theoretical foundations of spatially-variant mathematical morphology Part I: binary images [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2008, 30(5): 823-836
- [4] Guo Jun, Pan Shen, Hu Xiaojian. Edge detection in tobacco leaf image based on grayscale morphology [J]. Computer Engineering, 2007, 33(21): 163-165 [郭俊, 潘申, 胡小建. 基于灰度形态学的烟叶图像边缘检测 [J]. 计算机工程, 2007, 33(21): 163-165]
- [5] Deng Ting-quan, Dai Qionghai. Representation theorem of grayscale mathematical morphology [J]. Computer Engineering, 2005, 31(15): 1-3 [邓廷权, 戴琼海. 关于灰度数学形态学的表示定理 [J]. 计算机工程, 2005, 31(15): 1-3]
- [6] Kang Huaqi, Shi Caircheng, Zhao Baojun, et al. A method of edge detection based on extended mathematical morphology [J]. Optical Technique, 2006, 32(4): 634-638 [康怀祺, 史彩成, 赵保军等. 一种基于扩展数学形态学的边缘检测方法 [J]. 光学技术, 2006, 32(4): 634-638]
- [7] Nidhal Bouaynaya, Dan Schonfeld. Theoretical foundations of spatially-variant mathematical morphology part II: gray-level images [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2008, 30(5): 837-850
- [8] Fan Linan, Zhang Guangyuan, Han Xiaowei. Image Processing and Pattern Recognition [M]. Science Press, 2007 [范立南, 张广渊, 韩晓微. 图像处理与特征提取 [M]. 北京: 科学出版社, 2007]
- [9] Zhang Dongfang, Wang Xiangzhou. Image edge processing based on mathematical morphology [J]. Microcomputer Information, 2006, 22(8): 186-188 [张冬芳, 王向周. 基于数学形态学的图像边缘处理 [J]. 微计算机信息, 2006, 22(8): 186-188]
- [10] Lezoray O, Elnoutaz A, Meurie C. Mathematical morphology in any color space [C] // Proceedings of the 14th International Conference of Image Analysis and Processing Workshops. Washington DC, USA: IEEE Computer Society, 2007: 183-187.
- [11] Jiang Joe-air, Chang Hsiang-yun, Wu Ke-han, et al. An adaptive image segmentation algorithm for X-ray quarantine

- inspection of selected fruits [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 60(2): 190-200
- [12] Li Ran. Preprocessing of leaf image based on mathematical morphology [J]. Agriculture Network Information, 2008, (1): 43-45 [李然. 基于数学形态学的植物叶片图像预处理 [J]. 农业网络信息, 2008, (1): 43-45]
- [13] Pedro Pina, Teresa Barata, Lourenco Bandeira. Morphological recognition of the spatial patterns of olive trees [C] // Proceedings of the 18th International Conference on Pattern Recognition. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2006, 845-848
- [14] Xue He-nu, Ma Shuo-shi, Pei Xi-chun. Color image segmentation based on mathematical morphology and fusion [J]. Journal of Image and Graphics, 2006, 11(12): 1764-1768 [薛河儒, 麻硕士, 裴春喜. 一种基于数学形态学及融合技术的彩色图像分割方法 [J]. 中国图象图形学报, 2006, 11(12): 1764-1768]
- [15] Fan Lin-nan, Han Xiao-wei, Xu Xin-he. Research on edge detection of color image on multi-structural elements morphology of HSI space [J]. Journal of Engineering Graphics, 2005, 26(2): 110-113 [范立南, 韩晓微, 徐心和. 基于 HSI 空间彩色图像多结构元形态边缘检测 [J]. 工程图学学报, 2005, 26(2): 110-113]
- [16] Zhou Long. Investigate on image's edge detection of pests in stored grain based on mathematical morphology [J]. Microcomputer Information, 2005, 21(3): 224-225 [周龙. 基于数学形态学的储粮害虫图像边缘检测算法研究 [J]. 微计算机信息, 2005, 21(3): 224-225]
- [17] Hu Dong, Tian Xian-zhong. A multi-directions algorithm for edge detection based on fuzzy mathematical morphology [C] // Proceedings of the 16th International Conference on Artificial Reality and Telexistence-Workshops. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2006, 361-364
- [18] Huang Kuo-yi. Application of artificial neural network for detecting Phalaenopsis seedling diseases using color and texture features [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2007, 57(1): 3-11.
- [19] Liang Guang-ming, Sun Ji-xiang. A algorithm of image segmentation with multi-structures based on mathematical morphology [J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(28): 70-72 [梁光明, 孙即祥. 一种基于数学形态学的多结构元图像分割算法 [J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(28): 70-72]
- [20] Zhang Shì-chā, Mao Han-ping, Hu Bq, et al. Morphological feature extraction for cotton disease recognition by machine vision [J]. Microcomputer Information, 2007, 23(4): 290-292 [郑世茶, 毛罕平, 胡波等. 机器视觉识别棉花病害中的形态特征提取 [J]. 微计算机信息, 2007, 23(4): 290-292]
- [21] Wu Dan, Liu Xi-guo, Shang Jian-ga. The application and prospect of mathematical morphology in image processing and analysis [J]. Journal of Engineering Graphics, 2003, 24(2): 120-125 [吴丹, 刘修国, 尚建嘎. 数学形态学在图像处理与分析中的应用及展望 [J]. 工程图学学报, 2003, 24(2): 120-125]
- [22] Yang Shu, Gao Li-qun, Gao Yi-qun, et al. Toe shape recognition based mathematical morphology and BP neural network [J]. Journal of Circuits and Systems, 2005, 10(4): 16-20 [杨姝, 高立群, 高以群等. 基于数学形态学和 BP 神经网络的脚趾形状识别方法 [J]. 电路与系统学报, 2005, 10(4): 16-20]
- [23] Xia Yong, Zhao Rong-chun, Jiang Ze-tao. Fractal dimension estimation based on mathematical morphology [J]. Journal of Image and Graphics, 2004, 9(6): 760-766 [夏勇, 赵荣椿, 江泽涛. 一种基于数学形态学的分形维数估计方法 [J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(6): 760-766]