

自动识别技术在昆虫分类鉴别研究中的应用^{*}

徐 鹏^{1,2} 陈乃中^{2**} 杨 定^{1**}

(1. 中国农业大学农学与生物技术学院 北京 100193; 2. 中国检验检疫科学研究院 北京 100029)

Automatic identification of insects. XU Peng^{1,2}, CHEN Nai-Zhong^{2**}, YANG Ding^{1**} (1. College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Chinese Academy of Inspection and Quarantine, Beijing 100029, China).

Abstract Automatic identification of insects is an important and emerging area of research. With many advantages such as of direct, rapid and convenient, this technology has been more and more paid attention. Insect is the biggest biological group of the world. Routine identification is a time-consuming work nevertheless the number of taxonomy experts is decreasing. In recent years, advances in automatic identification of insects have suggested an attractive solution to this dilemma. Many taxonomy experts explored the methods and theories of automatic identification of insects and some software were developed. This paper introduced the principles of automatic identification, classified the methods of automatic identification of insects, presented and analyzed the difficulties, and gave some solutions.

Key words automatic identification, insect, character

摘 要 昆虫的自动识别是重要的新兴研究领域,它以直接、快速、方便等优点日益受到人们的青睐。昆虫是世界上最大的生物类群,鉴定工作费时耗力,然而分类专家又在逐渐减少。近年来,昆虫自动识别技术的发展为解决这一矛盾提供了乐观的方案。众多分类学家不断探索自动识别的方法和理论,并开发出了一批识别软件。本文介绍自动识别的原理,分类讨论自动识别的技术和方法,并分析提出面临的困难和应对策略。

关键词 自动识别, 昆虫, 特征

自动识别技术是利用计算机分析图像,从中提取有效的识别信息,用来辨认“身份”的一门技术,它涉及到图像处理、模式识别、计算机视觉、神经网络等诸多学科的知识。随着计算机硬、软件的发展,自动识别已渗透到社会生活的众多方面,并且将在安保、交通、银行、海关、农业、科研等领域拥有广阔的应用空间。

自动识别技术在昆虫鉴定方面也有了初步发展,并进一步趋向成熟。昆虫是动物界中最大的一个类群^[1],目前已被命名的昆虫在100万种左右。昆虫与人类的关系复杂而密切,有的给人类带来深重的灾难,有的给人类提供丰富的资源,因此认识、了解昆虫具有重要意义。然而,要分清如此众多种昆虫对于普通人来说是不可能的,即使分类专家往往也只熟悉某一

类群的昆虫。如果能实现昆虫的自动识别,将对昆虫的分类鉴定产生巨大影响。

1 自动识别的概念与原理

1.1 自动识别的概念

自从1946年第一台计算机诞生以来,信息技术就在极大地改变着世界。自动识别的研究工作始于20世纪中前期,到20世纪60年代初已得到了相关学术界和应用部门的广泛重视^[1]。自动识别技术最早产生于条码识别领

^{*} 资助项目:“十一五”国家科技支撑计划重大项目(2006BAD08A13)。

^{**} 通讯作者, E-mail: Chennz@263.net.cn, yangding@cau.edu.cn

收稿日期:2009-07-24,修回日期:2009-10-27

域。早在 20 世纪 20 年代威斯丁豪斯 (Westinghouse) 实验室就开始研究条码识别。1949 年,专利文献中第 1 次有了发明全方位条码符号的记载^[1]。指纹识别是人们较早研究并利用的,且是最方便、最可靠的生物特征识别技术之一^[1]。20 世纪 60 年代,人脸识别研究初露端倪。Bledsoe^[1]以人脸特征点的间距、比率等参数为特征,建成了一个半自动的人脸识别系统。人脸识别技术在 20 世纪 90 年代成为科研热点,仅 1990 年到 1998 年之间,EI 可检索到的相关文献就多达数千篇^[1]。20 世纪 60 年代末 70 年代初出现了语音识别方面的几种基本思想,其中的重要成果是提出了信号线性预测编码 (LPC) 技术和动态时间规整 (DTW) 技术,同时提出了矢量量化 (VQ) 和隐马尔可夫模型 (HMM) 理论。20 世纪 80 年代 HMM 模型和人工神经网络 (ANN) 在语音识别中的成功应用成为语音识别研究进一步走向深入的标志^[7]。后来虹膜识别开始兴起,1987 年,两个美国眼科专家 Leonard Flom 和 Aran Safir 获得虹膜识别概念的专利^[1]。1991 年,美国洛斯阿拉莫斯国家实验室的 Johnson 实现了一个自动虹膜识别系统,这是有文献记载的最早的一个应用系统^[1]。20 世纪末人们开始了对汽车牌照自动识别的研究^[10],同时掌纹识别作为一种生物识别技术也发展了起来。目前,掌纹识别作为生物识别家族中的重要成员,已在国际上得到公认,并产生了较大影响^[11]。

所谓自动识别 (automatic identification 简称为 Auto-ID) 是以计算机技术和通信技术为基础的一门综合性科学技术,是数据编码、数据采集、数据标识、数据管理、数据传输的标准化手段^[1]。

1.2 自动识别的原理

自动识别系统通常包含 2 个模块:(a) 注册模块和 (b) 识别模块,如图 1 所示。

(a) 注册模块:基于训练样本特征建立鉴别特征数据库。该模块由以下 4 个步骤来实现:

①获取数码图像:用数码相机或扫描仪等

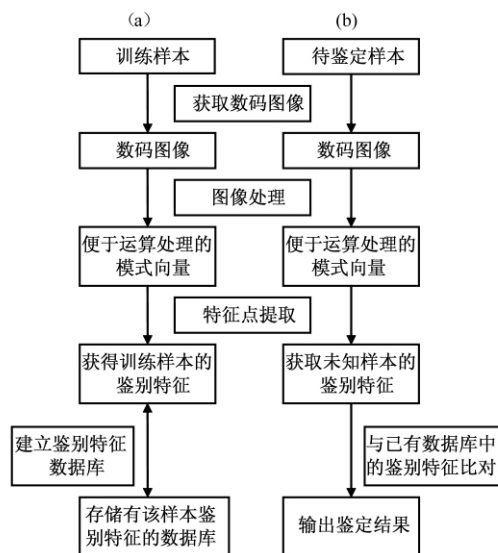


图 1 自动识别原理示意图 (仿 Gaston)

获取图像。

②图像预处理包括:图像压缩、噪声过滤、图像增强、图像分割、图像旋转、数字形态学处理等。该步骤主要目的是把图像转变成易于运算处理的模式向量。

③特征提取:通过特征识别传感器提取图像中的鉴别特征,这是自动识别的关键步骤。提取技术是众多学者研究的重点,也是自动识别中的一项技术难点,至今还没用通用的提取技术,需要根据识别对象的特点选择不同的提取方法。

④建立鉴别特征数据库:将提取的鉴别特征存储在数据库中,作为识别物体的标准。

(b) 识别模块:根据已建立的鉴别特征数据库识别未知样本。该模块前 3 步与过程 a 类似,第 4 步将提取的待鉴定样本特征与已建立的鉴别特征数据库中的特征比对,最终输出鉴定结果。

2 昆虫的自动识别方法

随着 20 世纪 40 年代计算机的出现,20 世纪 50 年代人工智能的兴起,昆虫分类学不断与信息技术结合,渐渐形成了一门新的学科——昆虫自动识别。所谓昆虫自动识别就是完全依

靠计算机根据昆虫图像对昆虫进行鉴别^[2]。它充分利用计算机视觉技术,通过感知昆虫的几何信息,进而对昆虫图像进行描述、存储与理解最终达到识别的目的。虽然从20世纪五、六十年代起计算机就开始应用于昆虫分类学领域^[3],但这方面的研究工作一直进行缓慢。昆虫自动识别技术的真正发展是在20世纪90年代,并逐步出现了一些成熟的自动识别软件。几十年来众多学者对昆虫自动识别进行了深入研究,探索了很多识别方法。

2.1 基于模板匹配的方法

模板匹配法是一种经典的模式识别方法,也是研究较早的方法之一。它主要是通过计算模板和图像之间的相关性来实现识别功能。刘景东^[4,15]以专业研究人员的手绘图作为图源,提取翅脉上22个特征点,构建了卷蛾亚科Tortricinae(Lepidoptera)53个种前翅的翅脉模板图。当拿到待鉴定标本时,先让电脑自动测定其各翅脉交点坐标,再求出与数据库中的53个种的交点坐标的相异度,最后在屏幕上显示出它与53个已知种的相异度名次,相异度越小,说明彼此翅脉越相似,与要鉴定的标本是同种的可能性越大。

2.2 基于形态学的识别方法

形态学识别法通过提取昆虫外部形态特征,包括虫体部件归一化的点间距离和比率以及虫体的一些特征点(如翅脉节点、终点等),构成二维拓扑结果进行识别。

2.2.1 数学形态学识别法 数学形态学(Mathematical Morphology)是图像处理和图像识别技术的发展,是用数学方法描述或分析一个物体图像的形状的理论和方法^[6]。沈佐锐等最先将数学形态学引入昆虫鉴别领域,提出了昆虫数字形态学的概念^[7]。它主要包括3方面的内容:①昆虫数学形态学技术研究;②昆虫数学形态学理论研究;③昆虫和昆虫数学形态学应用基础研究。沈佐锐等^[7]基于昆虫数字形态特征的差异开发了自动识别系统BugVisux系列,先将昆虫图像数字化,然后进行图像的编码、压缩、增强、分割、复原等处理,再

用积分几何方法测量图像面积、周长、偏心率等10项几何参数,最后利用二叉分类机制实现了昆虫的自动识别。基于数学形态学的识别方法具有如下优点:①符合人类的视觉机理,易于理解;②存储空间小;③对光照变化不太敏感。但这种方法也存在一些问题:①对姿态变化的鲁棒性较差;②一般几何特征只描述了昆虫的基本形状与结构关系,忽略了局部细微特征,造成部分信息丢失,更适合于粗分类。潘鹏亮等^[8,19]对昆虫翅脉的数字化进行了研究,利用DrawWing、TPSDig等软件成功实现了对蝴蝶的翅脉的数字化处理,进一步拓宽了这些软件的应用范围。

2.2.2 几何形态学识别法 几何形态学是一门研究形态变化的新兴技术^[20]。在20世纪80年代,在数据收集和分析上产生了重要突破——标点和标点相对位置的几何信息的匹配,从而可以将多变量分析的标点集叠加到生物原始图上,它不仅仅是生成散点图,而是试图客观反映生物的形态性状。这项技术被称为几何形态测量法(geometric morphometrics)^[21]。与传统测量方法不同的是,几何形态测量法更注重轮廓线和特征点的测量和分析,如翅脉节点、终点等。该方法可重构图形来代表线性距离,这样可以保存更多的细节信息,提高测量精度。自从几何形态学诞生以来,众多学者研究了其在昆虫分类学中的应用。Baylac等^[22]证明了几何形态学很适合复杂的分类问题。Christian等^[23]利用几何形态学分析熊蜂翅的变异性来推断其翅的发育模型。Gilchrist等^[24]开发出昆虫翅脉特征提取分析软件Morphometrika,最终实现了昆士兰果蝇野生种群和人工繁殖种群的鉴定。

2.3 基于统计学的识别方法

统计自动识别把观察对象表达成一个特征向量,将模式类表达为由有穷或无穷个具有相似数值特征的模式组的成集合。识别是从模式中提取一组特性的量度,构成特征向量来表示模式,然后通过划分特征空间的方式进行分类。

2.3.1 主成分分析(Principal Component

Analysis, PCA) 法 主成分分析是多元统计分析中用来分析数据的一种方法。它是一种用较少数量的特征对样本进行描述以达到降低特征空间维度的方法,其基础是 KL 变换。Weeks 等^[25,26]开发了基于主成分分析法的翅脉自动识别软件 DAISY,将包含翅脉图像的区域看作是一种随机向量,采用 KL 变换获得其正交 KL 底,对应其中较大特征值的基底具有与翅脉相似的形状,利用这些基底的线性组合可以描述、表达和逼近翅脉图像,所形成的图像称为翅脉特征图。识别过程就是将翅脉图像映射到由翅脉特征图张成的子空间上,比较其与已知翅脉在翅脉特征图空间中的位置。作为一种图像统计方法,图像中的所有像素被赋予了同等的地位,角度、光照、尺寸等干扰会导致识别率急剧下降。由于需要对所有像素进行统计,降低了运算速度,随着数据库中昆虫种类的增多,识别率也有下降趋势。

2.3.2 核判别分析 (Kernel discriminant Analysis, KDA) 法 基于 Fisher 准则的核判别分析法 (KDA) 是最常用的非线性特征提取方法之一^[27],是 Baudat 等将线性判别分析 (Linear discriminant analysis, LDA) 推广到非线性而提出的^[28]。KDA 算法的思想是:首先通过一个非线性映射,将输入数据映射到一个高维的线性可分的特征空间中,然后在这个特征空间中进行线性 Fisher 判别分析,从而实现相对于输入空间的非线性判别分析^[29]。Arbuckle 等^[30,31]基于 KDA 开发了蜜蜂自动识别软件 ABIS,实现了对大多数欧洲蜜蜂的鉴别。但该方法也存在一定缺陷,它过分强调那些与其他类之间具有较大距离的类别(边缘类),从而使得最后的投影方向偏向边缘类,造成了那些具有较小类间距离类别的较大重叠^[27]。

2.4 基于机器学习的方法

机器学习的方法相比前几类方法有一定的优势,它可以通过学习来获得对昆虫识别规律和规则的隐性表达,避免了复杂的特征提取工作,它的适应性更强,运算速度也更快。

2.4.1 人工神经网络 (Artificial Neural Networks, ANN) 人工神经网络是由大量简单处理单元以某种方式相互连接,对连续的输入做出状态响应的动态信息处理系统。它模拟人脑生物神经网络系统处理信息的方式,通过经验而不是通过设计好的程序进行学习、训练和识别^[32]。姚青等^[33]以雄虫求偶鸣声信号频率峰值作为输入向量,利用 Matlab 软件分析人工神经网络对飞虱鸣声的识别能力,识别率达 90.6%。李振宇等^[34]以翅振频率为特征值建立神经网络实现了对 5 种蚊虫的鉴别。

2.4.2 支持向量机 (Support Vector Machines, SVM) 支持向量机是一类新型的机器学习方法,是基于统计学习理论、根据结构风险最小化原理而推导出来的。由于其出色的学习性能,该技术已经成为机器学习界的研究热点^[35]。SVM 分类器是一种线性分类器,它选择可分离的超平面,以使不可见的测试模式的预知分类错误最小,目的是使期望总体误差的上边界最小^[36]。Mayo 等^[37]用 SVM 分类器鉴别了英国 35 种蛾的 744 头活体标本,识别率为 85%。

2.5 基于曲线拟合的方法

Tofilski^[38]通过贝塞尔曲线拟合翅形和翅脉的方法开发了自动识别软件 DrawWing。该软件可自动获取翅和翅脉的极值,将图像转化成黑白二值图。拥有最长轮廓的图形被视为翅缘。利用翅脉极值生成翅脉骨架,在通过细化算法将骨架转化成翅脉主线。在翅的定位时选择 3 个特征点:翅尖、前缘顶点、后缘顶点,然后用贝塞尔曲线拟合出翅形和翅脉。程序忽略掉了翅脉的宽度,每条翅脉仅用 1 条曲线代替。最后通过计算翅脉长度实现种类鉴别。Houle 等^[39]利用 B 样条曲线拟合翅脉的方法开发了能鉴别活体昆虫的识别程序 INDWING。曲线拟合法比像素分析法(如 PAC)更为简单和直观,而且由于曲线数比像素数少的多,所以识别速度更快,当对大量种类进行鉴别时这一优点便显得更加明显。但这种方法无法把翅痣转化成线的组合。目前 DrawWing 软件还不能识别大的黑暗区域,也无法用线条拟合出翅痣的形

状,在识别翅上有斑纹的昆虫时会出现错误。

2.6 基于灰度变化的方法

王颖等^[60]基于图像的灰度变化研究了昆虫翅膀图像特征的亚像素级提取方法。昆虫翅脉、翅脉节点及翅膀边缘是昆虫翅膀运动变形三维重构的主要依据。对于翅脉中心,作者采用 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,然后通过求灰度图像的梯度,在其梯度变化方向求极值点的方法提取翅膀边缘特征;此外根据翅脉方向变化的连续性提出了邻域角度约束方法确定翅脉交叉点,从而最终提取到亚像素级的翅膀边缘、翅脉及交叉点等特征。该方法针对不同特征的灰度分布特点采用不同的算法进行特征提取,提高了图像特征提取的精度,减少了噪声的影响,尤其适用于特征信号较弱的图像。

2.7 几种混合方法综合应用

左西年等^[61]将蚁蛉翅脉分类特征鉴定归结为相应的数学问题:在翅脉定位时摒弃了传统的边缘检测算法,构造了自适应阈值化、数学形态学方法、基本骨架算法(ESA)、孤岛移除、张量选举等算法,对解决蚁蛉生物特征自动鉴定中最重要的一步“翅脉定位”给出一种解决方案。然后使用阈值化技术和数学形态学方法得到蚁蛉翅脉的大致分布,再使用 TensorVoting 技术对所得到的主脉图像进行修补,便获得了完整的主脉图像,将其用于分类特征提取。

3 昆虫自动识别面临的问题

3.1 图像质量和噪声问题

昆虫图像的质量是自动识别的基础,很多因素如标本的摆放姿势,光照强弱,背景等都会影响到图像的质量。此外,无处不在的噪声严重影响识别结果^[62]。由于噪声的随机性和不可预测性,如何降低噪声便成为一项技术难题。

3.2 算法的普遍适用性问题

目前研究的众多算法和软件只适用于某一科甚至几个种的昆虫^[69],至今还没有普遍适用的分割、识别等算法。这无疑增加了研究的工

作量和实用化的难度。寻找适合多种科、目昆虫的识别算法成为一大挑战。

3.3 特征数据库的问题

一般情况下训练集样本数量越大,所提取的特征就越符合该种昆虫的普遍特征,识别率就越高。但对于稀缺物种或标本很少的物种来说,建立高质量的特征数据库就不容易了。另外,特征数据库中包含的昆虫种类越多,识别率就越低,而且每次鉴别时重复比对次数会增多,鉴别速度降低,对计算机的配置要求也会提高。针对该问题有人建议^[66]尝试分级鉴别的方法。先鉴别到科或属,再用相应软件鉴别到种。这样可以大量减少每一软件中所包含的种类数量。

3.4 误差问题

误差是影响识别率的一大因素,虽然很多人致力于提高识别率的研究,但不可接受的误差依然存在。所采用的图像处理方法(如图像增强,图像分割等)不同,误差也不一样。Gaston 等^[63]认为误差还有进一步降低的可能。很多识别方法只关注某个单一特征,如翅脉,这样得到的数据是有限的。如果结合其他特征,误差会大幅降低。

3.5 对新种的鉴定

大部分软件的鉴别方法是将待鉴别种的特征与数据库中的特征比对,相关性最高的种即为鉴定种。但对于新种来说,数据库中并没有该物种,但比对后也能找到一个与之相关性最高的种,尽管相关系数不高^[69]。但这样的鉴别结果就是错误的。针对这一问题,可以设立相关系数阈值加以解决。只有待鉴定种与数据库中某个种的相关系数高于该阈值时,才能判定其属于该种。

3.6 自动化程度问题

现在开发的大部分自动识别软件都需要人为干预。以目前常见的 3 大类识别系统 DAISY、SPIDA、ABIS 为例,三者获取图像时都需要大量的手工工作,首先要将翅脉从标本上切下,还要将翅安放放到显微镜上,翅的安放位置,大小比例,光照强度等都要耗费大量时间,

而且这些过程还很容易对翅造成损坏,影响图像质量。因此还算不上真正意义上的自动识别,只能称为半自动识别。如何提高自动化程度,减少人为干预仍是一个挑战。

3.7 开发成本问题

自动识别的发展涉及到计算机硬件更新、图形图像处理软件的升级^[33]、相应数学算法的研究等,因此开发成本很高。由于该技术不成熟,没有达到应用的水平,所以无法进行商业运作,从而导致资金短缺,这也是限制其发展的一个因素。

4 总结与展望

对昆虫自动识别的研究才刚刚起步,因此不像人脸、指纹等生物识别技术那样得到成熟的发展,目前仍停留在借鉴其他生物特征识别技术的阶段,还未形成和发现最能适合昆虫自身结构特点的经典算法。但经过众多学者、专家几十年来的不懈努力,已取得了不少成绩。鉴于昆虫识别的复杂性,仅仅单独使用任何一种现有的方法都不可能取得很好的识别效果,结合多种基本方法,应该成为一种研究方向。昆虫自动识别技术方兴未艾,随着人工智能的发展,该技术将在众多领域发挥巨大作用。

参 考 文 献

- 1 彩万志,庞雄飞,花保祯,等.普通昆虫学.北京:中国农业出版社,2001.1~9.
- 2 李补莲.自动目标识别(ATR)技术发展述评.现代防御技术,2000,28(2):10~15.
- 3 中国物品编码中心、中国自动识别技术协会编著.自动识别技术导论.武汉:武汉大学出版社,2007.6.
- 4 裘正定,付鹏.生物特征识别技术及相关问题综述.中国数信,2003,3:27~30.
- 5 Bledsoe W. Man machine facial recognition. *Panoramic Research Inc.* Palo Alto, CA, 1966, Rep PR I: 22.
- 6 张翠平,苏光大.人脸识别技术综述.中国图像图形学报,2000,5(11):885~894.
- 7 柳春.语音识别技术研究进展.甘肃科技,2008,24(9):41~43.
- 8 Boles W. W., Boashash B. A human identification technique using images of the iris and wavelet transform. *IEEE Trans on Signal Processing*, 1998, 46(4): 1 185~1 188.
- 9 周颀,杨清平.虹膜识别技术综述.科学技术与工程,2007,7(14):3 497~3 503.
- 10 李爱成,孙卫.车辆牌照自动识别的原理和实现.金陵科技学院学报,2005,21(1):351~352.
- 11 邬向前,张大鹏,王宽全.掌纹识别技术.北京:科学出版社,2006.22~23.
- 12 赵汉青,沈佐锐,于新文.数学形态特征应用于昆虫自动鉴别的研究.中国农业大学学报,2002,7(3):38~42.
- 13 Yu D. S., Kokko E. G., Barron J. R., et al. Identification of ichneumonid wasps using image analysis of wings. *Syst. Entomol.*, 1992, 17: 389~395.
- 14 Liu J. D. The expert system for identification of tortricinae (Lepidoptera) using image analysis of venation. *Entomol. Sin.*, 1996, 3(1): 1~8.
- 15 Liu J. D. How to construct the expert system for species identification using venation of tortricinae (Lepidoptera). *Entomol. Sin.*, 1996, 3(2): 133~137.
- 16 唐常青.数学形态学方法及其应用.北京:科学出版社,1990.1~3.
- 17 沈佐锐,于新文.昆虫数学形态学研究及其应用展望.昆虫学报,1998,41(增刊):140~148.
- 18 潘鹏亮,沈佐锐,高灵旺,等.昆虫翅脉特征自动获取技术的初步研究.昆虫分类学报,2008,30(1):72~80.
- 19 潘鹏亮,杨红珍,沈佐锐,等.翅脉的数学形态特征在蝴蝶分类鉴定中的应用研究.昆虫分类学报,2008,30(2):152~160.
- 20 Rohlf F. J., Marcus L. F. A revolution in morphometrics. *Trends Ecol. Evol.*, 1993, 8(4): 129~132.
- 21 白明,杨星科.几何形态测量法在生物形态学研究中的应用.昆虫知识,2007,44(1):143~147.
- 22 Baylac M., Villemant C., Simbolotti G. Combining geometric morphometrics with pattern recognition for the investigation of species complexes. *Biol. J. Linnean Society*, 2003, 80: 89~98.
- 23 Christian P. K., Alexander V. B., Susanna M. S., et al. Inferring developmental modularity from morphological integration: Analysis of individual variation and asymmetry in bumblebee wings. *The American Naturalist*, 2001, 157(1): 11~23.
- 24 Gilchrist A. S., Crisafulli D. C. A. Using variation in wing shape to distinguish between wild and mass-reared individuals of queensland fruit fly, *Bactrocera tryoni*. *Neth. Entomol. Soc.*, 2006, 119: 175~178.
- 25 Weeks P. J. D., O'Neill M. A., Gaston K. J., et al. Species-identification of wasps using principal component associative memories. *Image Vis. Comput.*, 1998, 17: 861~866.

- 26 Weeks P. J. D. , O'Neill M. A. , Gaston K. J. , *et al.* Automating insect identification: exploring the limitations of a prototype system. *Appl. Entomol.* ,1999 ,**123**: 1 ~ 8.
- 27 周大可,唐振民. 一种加权核鉴别分析方法. 南京航空航天大学学报,2008 ,**40**(2) :227 ~ 230.
- 28 Baudat G. , Anouar F. Generalized discriminant analysis using a kernel approach. *Neural Computation* , 2000 , **12** (10) :2 385 ~ 2 404.
- 29 杨国鹏,余旭初,陈伟,等. 基于核 Fisher 判别分析的高光谱遥感影像分类. 遥感学报,2008 ,**12**(4) :580 ~ 586.
- 30 Arbuckle T. , Schroder S. , Steinhage V. , *et al.* Biodiversity informatics in action: identification and monitoring of bee species using ABIS. In: Hilty L. M. , Gilgen P. W. , (eds.). 15th International Symposium on Informatics for Environmental Protection. Metropolis: Zurich, 2001. 425 ~ 430.
- 31 Arbuckle T. Automatic identification of bees' species from images of their wings. In 9th International Workshop on Systems, Signals and Image Processing. UK: Manchester: UMIST, 2002.
- 32 卜宪敏,郑智勇,余英豪. 网络在病理学自动识别中的应用. 国体视学与图像分析,2005 ,**10**(2) :122 ~ 126.
- 33 姚青,赖凤香,傅强,等. 基于人工神经网络的昆虫鸣声识别. 昆虫分类学报,2005 ,**27**(1) :19 ~ 22.
- 34 李振宇,周祖基,沈佐锐,等. 人工神经网络在蚊虫自动鉴定中的应用. 四川农业大学学报,2005 ,**23**(4) :411 ~ 416.
- 35 张浩然,汪晓东. 支持向量机的学习方法综述. 浙江师范大学学报(自然科学版),2005 ,**28**(3) :283 ~ 288.
- 36 樊振萍. 人脸检测与识别技术综述. 人工智能及识别技术,2008 ,**5**:1 292 ~ 1 295.
- 37 Mayo M. , Watson A. T. Automatic Species Identification of Live Moths. *Knowledge-Based Systems*,2007 ,**20**. 195 ~ 202.
- 38 Tofilski A. DrawWing, a program for numerical description of insect wings. *Insect Sci.* , 2004 ,**4**(17) :5.
- 39 Houle D. , Mezey J. , Galpern P. , *et al.* Automated measurement of Drosophila wings. *BMC Evolutionary biology* , 2003 ,**3**: 13. (<http://www.biomedcentral.com/1471-2148/3/25>)
- 40 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. 北京航空航天大学学报,2005 ,**31**(8) :439 ~ 442.
- 41 左西年,刘来福,王心丽,等. 基于 Tensor Voting 的蚊蛉翅脉修补. 北京师范大学学报(自然科学版),2005 ,**41**(2) :135 ~ 138.
- 42 何振毅,陆永忠. 病媒昆虫分类技术的研究进展. 中国国境卫生检疫杂志,2006 ,**29**(3) :190 ~ 193.
- 43 Gaston K. , O'Neill M. Automated species identification: why not? *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* ,2004 ,**359**:655 ~ 667.