

# 基于图像处理的骨架提取算法的应用研究

刁智华 吴贝贝 毋媛媛 魏玉泉

(郑州轻工业学院电气信息工程学院 郑州 450002) (河南省信息化电器重点实验室 郑州 450002)

**摘要** 骨架在图像分析与形状描述中是一个非常重要的变换,是图像几何形态中普遍存在而又难以描述的重要拓扑结构。骨架提取技术在图像处理学领域一直是人们关注的焦点。在广泛调研文献的基础上,对骨架提取方法进行了较为全面的综述,重点总结了其在农业领域中的应用,并对骨架提取技术在其他方面的应用也进行了概述。最后指出了目前存在的问题以及骨架提取算法的主要发展趋势,并对其进行了总结和展望,以期为该领域的发展和相关研究提供借鉴与参考。

**关键词** 骨架提取,精准施药,特征提取

中图法分类号 TP391.4 文献标识码 A

## Application Research of Skeleton Extraction Algorithm Based on Image Processing

DIAO Zhi-hua WU Bei-bei WU Yuan-yuan WEI Yu-quan

(College of Electric and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

(Henan Key Lab of Information-based Electrical Appliances, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract** The skeleton is an important transform in image analysis and shape description, which is ubiquitous and an important topological structure that is difficult to describe in image geometry. Skeleton extraction technology in image processing has been the focus of scholars' attention. Based on extensive literature research, the extraction methods of skeleton were reviewed, its applications in agriculture were summarized, and the skeleton extraction technique used in other aspects were introduced. Finally, we indicated the main problems and the trends of the skeleton extraction algorithm, and carried on the summary and outlook to provide reference to the development and related research of the field.

**Keywords** Skeleton extraction, Precision spraying, Feature extraction

随着计算机视觉技术的飞速发展,图像处理技术表现出处理精度高、再现性好、灵活性高、适用面宽等一系列优点,在农业、医学、军事等各个领域依靠图像处理技术对物体进行形状分析和识别起着愈发重要的作用。基于图像的骨架提取技术在图像分析与形状描述中是一个非常重要的变换,骨架是图像几何形态的重要拓扑描述,是进行图像目标的形状分析、特征提取、模式识别等应用的前提。自 1967 年 Blum 提出骨架的概念以来,曲线骨架提取成为虚拟导航、形状匹配、指纹识别、医学图像处理等领域研究的热点。

本文以骨架提取技术为主,论述了基于图像处理的骨架提取技术的有关应用,给出了目前研究中存在的问题,并对图像技术在该领域的应用前景进行了总结与展望。

## 1 骨架提取技术

一个图像的骨架是指目标的中轴。所谓骨架,就是由单个像素的点组成,可以有效地反映出原物体形状的连通性和拓扑结构。一般来说,获取图像的骨架的过程也就是对该图像进行“细化”的过程。

骨架是模型几何形态的一种重要拓扑描述,是一种重要

的几何特征,它是所有中心点元素(骨架子集)组成的集合。目前骨架提取的算法可以分为以下几类:

- (1) 基于拓扑与几何分析的方法,该方法通过构造 Voronoi 或 Reeb 模型图来获取目标图像的骨架;
- (2) 拓扑细化算法,此算法是从边界开始反复迭代计算,逐层均匀剥掉图形的边界,直至剩下最里层的一维骨架;
- (3) 距离变换骨架提取法,该方法通过获取模型内点的距离变换值,提取距离场中的局部极值点作为骨架点,利用参数细化并进行调整得到骨架;
- (4) 广义势场法提取骨架,该方法采用牛顿静电力学模型找到能使种子点达到力学平衡的点,这些点组成的集合就是最后的骨架。

## 2 骨架提取技术在农业领域中的应用

### 2.1 在作物行导航检测中的应用

作为精准农业的一个重要分支,利用农业机器人视觉导航系统去识别农作物的行(垄)进行精确对靶施药已成为一个很热门的研究领域。然而作物行骨架提取的精准度是机器视觉导航的关键,会影响精确对靶施药的准确性。国内专家学

本文受国家农业智能装备工程技术研究中心开放基金项目(KFZN2012W12012),河南省科技厅重点科技攻关项目(132102110150),郑州市科技局普通科技攻关项目(131PPTGG411-13),郑州轻工业学院研究生科技创新基金项目(2014003)资助。

刁智华(1982-),男,博士,副教授,主要研究方向为图像处理与模式识别,E-mail: Diaozhua@163.com; 吴贝贝(1989-),女,硕士生,主要研究方向为图像处理及其应用。

者在作物行识别和骨架提取导航信息方面做了大量的研究工作。李茗萱等<sup>[1]</sup>针对不同作物行图像采用扫描滤波导航线提取法可以快速地提取作物行骨架,满足农机导航要求。车武军等<sup>[2]</sup>提出一种基于改进的细化算法,首先利用传统的细化算法求出连通的骨架,然后引入 snake 模型调整骨架的位置,从而解决了骨架位置不精确的问题。刁智华等<sup>[3]</sup>运用细化算法先提取出小麦作物行的骨架,然后再对细化后的作物行进行直线拟合作为导航路径,该算法能快速有效地提取田间作物行。姜国权等<sup>[4]</sup>提出一种可以满足不同田间图像作物行的提取算法,该算法能够满足农业机器人田间作物的实际需求,识别率达 98%。在此基础上,司永胜等<sup>[5]</sup>采用基于最小二乘法对作物行进行拟合,实现了在杂草和作物缺失情况下的行中心线的识别。袁池等<sup>[6]</sup>提出一种有效的果树行中心线检测算法,实验表明,该算法能够快速准确地检测出果树行中心线。孟庆宽等<sup>[7]</sup>以玉米作物行图像为研究对象,设计了一种基于线性相关系数约束的作物行中心线检测方法,该算法能快速有效地提取作物行中心线。次年,此人又提出一种基于直线扫描的作物行直线检测算法<sup>[8]</sup>,该算法可以有效地识别出作物行,运算速度快,抗干扰性强。胡炼等<sup>[9]</sup>研究了棉花和生菜苗期机械除草的作物识别和定位方法,准确率高达 95.8% 和 100%。张志斌等<sup>[10]</sup>建立了多垄线识别算法模型,在一定程度上消除了田间图像中出现的杂草、断垄和缺垄的影响。李景彬等<sup>[11]</sup>提出采棉机视觉导航直线检测方法,能够达到采棉机实际作业的要求。马红霞等<sup>[12]</sup>采用 Hough 变换的方法较准确地得到了导航基准线,为机器视觉导航提供了一种新颖可行的方法。任永新等<sup>[13]</sup>在基于机器视觉的机器人自主导航技术基础上,以机器人运动的角度偏差  $25^\circ$  为标准,提出了预测控制和模糊控制相结合的路径跟踪法,对规划的路径能很好地进行平滑跟踪。周俊等<sup>[14]</sup>运用机器视觉提出一种能在线检测运动障碍物的算法,在机器人作业时,能有效检测出存在的障碍目标。陈艳等<sup>[15]</sup>为克服农业机械自动导航的准确可靠性低的问题,构建了 GPS 与机器视觉相结合的导航定位系统,该系统能够克服两者单一使用的缺点,使定位曲线骨架平滑,满足自动导航系统的要求。

## 2.2 在作物识别中的应用

骨架区别于其他物体结构的重要特点在于它能够保持物体原始形状的拓扑结构和几何性质。近年来,随着图形图像处理技术的迅猛发展以及新思想、新方法的引入,基于图像处理技术的骨架提取算法在目标作物识别方面不断得到完善,并取得了一定的成果。Bittle 等<sup>[16]</sup>在骨架提取算法的研究中,计算了距离变换和距离变换的  $L$  阶导数变换,提高了骨架点提取的精确度。郇正良等<sup>[17]</sup>利用细化线方法中的串行运算来识别生长正常和生长畸形的植株胚芽,实验结果表明该方法可行且具备了实用化要求。吕哲等<sup>[18]</sup>提出的改进的形态学骨架提取算法不仅使获得的骨架具有良好的中轴特性而且拥有较好的连通性、单像素宽度及相对简单化的结构。赵春江等<sup>[19]</sup>以玉米为例,研究了基于两幅图像的作物植株三维骨架的提取和重建法,实验结果表明,该方法可以快捷地重建玉米植株的骨架模型,且误差不超过 2%。徐莹<sup>[20,21]</sup>基于数学形态学理论,提出的改进的二值图像和改进的灰度图像骨架提取和重建算法都取得了很好的效果。张绍广等<sup>[22]</sup>提出了一种新的基于权值的骨架提取算法。刘同海等<sup>[23]</sup>针对

玉米株形图像,利用自身开发的玉米株形骨架提取软件提取出玉米株形的简单骨架,但提取到的骨架还不够完善。李川等<sup>[24]</sup>将距离场和细化算法结合起来提取骨架线,保证了骨架的连续性、准确性,同时实现简单、复杂度低。刘俊涛等<sup>[25]</sup>提出的物体线形骨架新算法成功提取出二维、三维物体的线形骨架。瞿鑫等<sup>[26]</sup>利用骨架特征对棉花纤维中的异性纤维进行了分类实验,得到了准确的异性纤维骨架。陈雪松等<sup>[27]</sup>采用图像骨架势能法提取的骨架保证了骨架特征不被遗失的特性。贾挺猛等<sup>[28]</sup>采用 Rosenfeld 细化算法提取的葡萄树枝图像的骨架较好地维持了其原形状。王松伟等<sup>[29]</sup>提出的骨架提取算法能较好地保留目标的主要拓扑结构,大大提高了运算速度。这些研究为目标作物的识别提供了可靠有力的基础。

## 2.3 在特征提取中的应用

图像的特征提取包括纹理特征细化提取、边缘特征细化提取。对它们进行特征提取的过程也即是对其进行细化的过程。Chaudhuri 和 Sarker<sup>[30]</sup>提出了分形维数差分计盒算法来描述图像的纹理特征。赵巨波等<sup>[31]</sup>利用正交小波变换的多尺度特性,采用互能量交叉的方法提取了飞机目标的边缘图像。张国立等<sup>[32]</sup>提出了一种用于车牌字符的图像提取及边缘检测法,仿真实验表明该方法能够更好地提取图像特征,检测出的边缘更清晰,并更好地填充了车牌字符的空隙。陈雪松等<sup>[33]</sup>利用二值图像像素所具有的骨架势能的方法对目标特征进行提取,证明了目标图像像素的势能对骨架结构能够很好地进行描述,具有较好的效果。陈桂芬等<sup>[34]</sup>对遥感影像进行分类时,加入了变差函数所计算的纹理特征值和神经网络算法,提高了分类的精度。

## 3 骨架提取技术在其他领域中的应用

### 3.1 在医学领域中的应用

从获取的医学图像中提取出目标骨架并构造出结构的几何表达,是医学图像分析中的一项基本且重要的工作。对于计算机辅助诊断与辅助手术治疗等具有非常重要的现实意义。随着骨架的广泛应用,国内外的研究人员展开了其在医学领域的研究,并取得了一定的研究成果。Sun Zheng 等<sup>[35]</sup>提出了一种从 X 射线冠状动脉血管造影图像序列定量估算在心脏周期中冠状动脉血管骨架整体位移的方法。Wang Sen 等<sup>[36]</sup>提出了一个简单而强大的对血管模型提取曲线骨架的方法。吴健等<sup>[37]</sup>在彩色脑血管图像的骨架提取中,结合渔区颜色特征,引入了贝叶斯分类模型,提取的骨架光滑且精确接近真实骨架位置。陈国栋等<sup>[38]</sup>提出一种基于人体特点和黄金比例律的人体模型骨架提取算法,该算法采用测地距离法对关节的位置进行了修正使提取的骨架效果更好。耿欢等<sup>[39]</sup>针对人体管状组织采用 FMM 优化双距离场,融合源距离场极值和三维 SUSAN 检测分支端点,该方法提取的骨架较传统的方法更居中、平滑。朱文博等<sup>[40]</sup>通过定义中心检测能量函数,使用分层多假设策略来提取冠脉骨架,具有较好的拓扑适应性。尽管骨架提取算法目前取得了很好的研究成果,但还存在一些不足之处,仍然需要进一步的研究和完善。

### 3.2 在车辆识别中的应用

车辆识别目前已成为机器视觉与模式识别领域的研究热点,通过对车牌的定位提取、字符分割和细化等技术来实现不

同车型的识别。国外已有比较成熟的车辆识别系统,国内在这方面的研究也取得了很好的成效。张曼婷等<sup>[41]</sup>采用投影与连通区域相结合的字符分割方法,提取车牌上字符并进行细致处理,然后提取字符骨架对车辆进行定位和识别。徐辉<sup>[42]</sup>采用了颜色对边缘检测算法来突出车牌字符轮廓边缘的像素点,进而快速准确地对车牌区域进行定位。张广清<sup>[43]</sup>采用等效球面矫正算法获取车辆的差分图片,实现了运输车辆车框的自动识别与定位。任其亮等<sup>[44]</sup>提出一种复杂背景下运动车辆车标定位与识别方法,可以有效的提取在复杂背景下运动车辆车标区域并从根本上解决了运动车辆标志的识别问题。宁彬<sup>[45]</sup>采用车牌定位技术、区域分割和位置校正等方法对车牌进行识别,提高了对车牌字符识别的清晰度。廉宁等<sup>[46]</sup>采用形态学边缘检测算法来提取车牌和字符的边缘,通过粗定位和精准定位得到准确的车牌区域。

### 3.3 在工业零件检测中的应用

在大批量的工业生产中,某个细微零件的缺失如果不应用机器视觉系统,将会浪费很大的人力物力。本节对骨架提取技术在工业零件检测中的应用做了研究。厉荣宣等<sup>[47]</sup>先根据边缘检测算子提取裂纹区域,然后通过计算轴类零件表面裂纹连通区域的圆形度和长宽比特征实现裂纹检测。韩丽等<sup>[48]</sup>采用通过计算模型各顶点的高斯曲率获取约束点的方法,得到更加符合模型拓扑特征的骨架。马艳娥等<sup>[49]</sup>利用最小二乘回归亚像素边缘检测技术对工业零件进行边缘定位及角点提取,提高了零件尺寸测量的精度。王玉槐等<sup>[50]</sup>采用自身提出的矩形透镜最大梯度模边缘检测算法对磁环和极片工业零件进行了检测,验证了该方法的有效性。运用图像处理技术,提取零件的边缘骨架特征,进行零件的模板匹配,可以对工业零件进行检测。

## 4 存在的问题

目前,由于新技术、新方法的不断展现,图像处理技术在骨架提取技术中的应用是现代高新技术的集中体现和发展趋势。虽然各国专家学者在该领域的研究取得了一些可观的成果,但还存在着许多问题:

- (1) 计算量大,对噪声的鲁棒性差;
- (2) 在图像处理过程中不能对图像进行有效地分割和提取,易受周围环境光照强度等因素的干扰,不同光照强度下自动识别作物的算法还不能够得到很好的检测;
- (3) 骨架提取的精确度还不能达到生产的要求,对于某些提取的骨架具有断点的现象还没有提出一种完善的解决方法;
- (4) 大多骨架提取算法还局限在对单一背景下的图像进行处理,对在复杂背景条件下的图像并不适用。

结束语 本文针对图像处理技术在骨架提取算法中的研究进展进行了探讨,总结了骨架提取算法在各领域的应用现状,并对近年来骨架提取算法存在的问题进行了总结和概述,以为未来学者的研究提供参考依据。

由于获取的目标图像复杂程度高,背景不单一,未来骨架提取算法的研究可以从以下几个方面出发:

- (1) 在作物行骨架提取时,针对提取的骨架具有的间断现象,可以考虑寻找虚拟骨架点连接间断骨架,使导航线拟合更准确;

- (2) 可以考虑用两种或两种以上的算法优点相结合的方式避免各自的缺点;

- (3) 对骨架提取算法进行优化和改进,减少计算量和运行时间,提高精度,使之更能适应实际应用需求。

## 参考文献

- [1] 李茗萱,张漫,孟庆宽,等.基于扫描滤波的农机具视觉导航基准线快速检测方法[J].农业工程学报,2013,29(1):41-47
- [2] 车武军,杨勋年,汪国昭.动态骨架算法[J].软件学报,2003,14(4):818-823
- [3] 刁智华,王会丹,宋寅卯.基于机器视觉的农田机械到航线提取算法研究[J].农机化研究,2015,37(2):35-39
- [4] 姜国权,柯杏,杜尚丰,等.基于机器视觉和随机方法的作物行提取算法[J].农业机械学报,2008,39(11):85-88
- [5] 司永胜,姜国权,刘刚,等.基于最小二乘法的早期作物行中心线检测方法[J].农业机械学报,2010,41(7):163-167
- [6] 袁池,陈军,武涛,等.基于机器视觉的果树行中心线检测算法研究[J].农机化研究,2013,35(3):37-39,45
- [7] 孟庆宽,刘刚,张漫,等.基于线性相关系数约束的作物行中心线检测方法[J].农业机械学报,2013,44(S1):216-222
- [8] 孟庆宽,何洁,仇瑞承,等.基于机器视觉的自然环境下作物行识别与导航线提取[J].光学学报,2014,34(7):172-178
- [9] 胡炼,罗锡文,曾山,等.基于机器视觉的株间机械除草装置的作物识别与定位方法[J].农业工程学报,2013,29(10):12-18
- [10] 张志斌,潘华稳,李琛,等.一种基于平均垄间距的视觉导航垄线识别算法[J].计算机工程与应用,2011,47(22):191-194
- [11] 李景彬,陈兵旗,刘阳,等.采棉机视觉导航路线图像检测方法[J].农业工程学报,2013,29(11):11-17
- [12] 马红霞,马明建,马娜,等.基于 Hough 变换的农业机械视觉导航基准线识别[J].农机化研究,2013,35(4):37-39,43
- [13] 任永新,李伟,陈晓,等.非结构环境下基于机器视觉的机器人路径跟踪方法[J].北京工业大学学报,2008,34(10):1021-1024
- [14] 周俊,程嘉煜.基于机器视觉的农业机器人运动障碍目标检测[J].农业机械学报,2011,42(8):154-158
- [15] 陈艳,张漫,马文强,等.基于 GPS 和机器视觉的组合导航定位方法[J].农业工程学报,2011,27(3):126-130
- [16] Bitter I, Kaufman A E, Sato M. Penalized-Distance Volumetric Skeleton Algorithm[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2001, 7(3): 195-206
- [17] 邹正良,陈燕,杨国青,等.一种图像细化算法及其在农业图象中的应用[J].山东农业大学学报(自然科学版),2004,35(3):446-450
- [18] 吕哲,王福利,常玉清,等.改进的形态学骨架提取算法[J].计算机工程,2009,35(19):23-25
- [19] 赵春江,杨亮,郭新宇,等.基于立体视觉的玉米植株三维骨架重建[J].农业机械学报,2010,41(4):157-162
- [20] 徐莹.基于数学形态学的图像骨架提取和复原的改进算法[J].成都信息工程学院学报,2009,24(3):259-263
- [21] 徐莹.改进的灰度图像的骨架提取与重建算法[J].绵阳师范学院学报,2011,30(2):89-91,100
- [22] 张绍广,李凤亭,马惠敏.一种基于权值的骨架算法[J].微计算机信息,2007,23(6):255-256
- [23] 刘同海,白鹏,李乃祥,等.基于 open CV 的玉米株型骨架提取研究[J].广东农业科学,2011,38(20):163-165
- [24] 李川,彭甫镛,陆建峰.基于距离场细化的骨架提取算法[J].微电子学与计算机,2011,28(10):114-117,121

- [25] 刘俊涛,刘文予,吴彩华,等.一种提取物体线形骨架的新方法[J].自动化学报,2008,34(6):617-622
- [26] 瞿鑫,丁天怀.皮棉中异性纤维骨架快速提取算法[J].农业机械学报,2010,41(6):177-181
- [27] 陈雪松,王乘,徐学军,等.一种运用势能理论的骨架特征提取方法[J].小型微型计算机系统,2011,32(1):151-155
- [28] 贾挺猛,荀一,鲍官军,等.基于机器视觉的葡萄树枝骨架提取算法研究[J].机电工程,2013,30(4):501-504
- [29] 王松伟,李言俊,张科,等.一种快速的目标骨架提取算法[J].红外与激光工程,2009,38(4):731-736
- [30] Sarkar N, Chaudhuri B B. An efficient differential box-counting approach to compute fractal dimension of image [J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, 1994, 24(1): 115-120
- [31] 赵巨波,孙华燕,杜巍.一种图像边缘特征提取算法[J].光学精密工程,2000,8(4):325-327
- [32] 张国立,杨瑾,李晶,等.基于小波包和数学形态学结合的图像特征提取方法[J].仪器仪表学报,2010,31(10):2285-2290
- [33] 陈雪松,徐学军.一种二值图像特征提取的新理论[J].计算机工程与科学,2011,33(6):31-36
- [34] 陈桂芬,曾广伟,陈航,等.基于纹理特征和神经网络算法的遥感影像分类方法研究[J].中国农机化学报,2014,35(1):270-274
- [35] Sun Zheng, Yan Qi. Motion estimation of 3D coronary vessel skeletons from X-ray angiographic sequences[J]. Computerized Medical Imaging and Graphics, 2011, 35: 353-364
- [36] Wang Sen, Wu Jianhuang, Wei Mingqiang, et al. Robust curve skeleton extraction for vascular structures[J]. Graphical Models, 2012, 74: 109-120
- [37] 吴健,崔志明,徐倩,等.基于 Level Set 模型的彩色脑血管图像骨架提取算法[J].计算机科学,2009,36(2):278-281
- [38] 陈国栋,李建微,潘林,等.基于人体特征三维人体模型的骨架提取算法[J].计算机科学,2009,36(7):295-297
- [39] 耿欢,杨金柱,赵大哲,等.一种面向人体管状组织的三维骨架提取算法[J].仪器仪表学报,2014,35(4):754-761
- [40] 朱文博,李彬,田联房,等.新型基于分层多假设跟踪的冠脉骨架提取算法[J].自动化学报,2014,40(8):1783-1792
- [41] 张曼婷,闫文耀,王庆.基于图像处理的车牌定位及字符识别算法研究[J].现代雷达,2014,36(8):26-40
- [42] 徐辉.基于 MATLAB 实现汽车车牌自动识别系统[J].电脑知识与技术,2010,6(17):4752-4754
- [43] 张广清.基于图像识别技术的运输车辆识别与定位方法及实现[J].冶金自动化,2014,38(2):28-33
- [44] 任其亮.复杂背景下运动车辆车标定位与识别方法[J].数学的实践与认识,2009,39(2):57-63
- [45] 宁彬.图像处理技术在机动车车牌自动识别技术中的应用[J].科学技术与工程,2013,13(2):366-371
- [46] 廉宁,徐艳蕾.基于数学形态学和颜色特征的车牌定位方法[J].图学学报,2014,35(5):774-779
- [47] 厉荣宣,沈希忠,张树行,等.基于图像处理的轴类零件表面裂纹检测[J].图学学报,2015,36(1):62-67
- [48] 韩丽,楚秉智,高小山.高斯曲率约束的 MRG 骨架提取优化算法[J].计算机辅助设计与图形学学报,2009,21(9):1227-1231
- [49] 马艳娥,张波涛,高磊,等.基于图像处理的零件尺寸测量研究[J].电子测试,2011,(8):39-41,95
- [50] 王玉槐,王琦晖,寿周翔,等.应用改进 Canny 法检测工业零件含噪图像边缘[J].轻工机械,2012,30(4):77-80

(上接第 221 页)

- [2] Liu Xin-yu, Wang Yu-peng, Sriram T N. Determination of sample size for a multi-class classifier based on single-nucleotide polymorphisms: a volume under the surface approach [J]. BMC Bioinformatics, 2014, 15: 190-198
- [3] Vogler C, Gschwind L, Coynel D, et al. Substantial SNP-based heritability estimates for working memory performance [J]. Translational Psychiatry, 2014, 4(9): 438-438
- [4] Schierding W, Cutfield W S, O'Sullivan J M. The missing story behind Genome Wide Association Studies: single nucleotide polymorphisms in gene deserts have a story to tell [J]. Frontiers in Genetics, 2014, 5: 39
- [5] Wei Bin, Peng Qin-ke, Kang Xue-jiao. A Hybrid Feature Selection Algorithm used in Disease Association Study [C] // the 8th World Congress on Intelligent Control and Automation. 2010, 5: 2931-2935
- [6] Talluri R, Wang Jian, Shete S. Calculation of exact p-values when SNPs are tested using multiple genetic models [J]. BMC Genetics, 2014, 15: 75
- [7] Roshyara N R, Kirsten H, Horn K, et al. Impact of pre-imputation SNP-filtering on genotype imputation results [J]. BMC Genetics, 2014, 15: 88-99
- [8] Richardson A M, Lidbury B A. Infection status outcome, machine learning method and virus type interact to affect the optimised prediction of hepatitis virus immunoassay results from routine pathology laboratory assays in unbalanced data [J]. BMC Bioinformatics, 2013, 14: 206-221
- [9] Duan L, Thomas D C. A Bayesian Hierarchical Model for Relating Multiple SNPs within Multiple Genes to Disease Risk [J]. International Journal of Genomics, 2013, 15: 406217
- [10] 周家蓬,裴智勇,陈禹保,等.基于高通量测序的全基因组关联研究策略[J].遗传,2014,10(5):1-22
- [11] Thieme S, Groth P. Genome Fusion Detection: a novel method to detect fusion genes from SNP-array data [J]. Bioinformatics, 2013, 29(6): 671-677
- [12] Brinza D, Zelikovsky A. Design and validation of methods searching for risk factors in genotype case-control studies [J]. Journal of Computational Biology, 2008, 15(1): 81-90
- [13] Wei Bin, Peng Qin-ke, Zhang Quan-wei. Identification of Combination of SNPs Associated with Graves' Disease using Swarm Intelligence [J]. Science China Life Sciences, 2011, 2(2): 139-145
- [14] Wei Bin, Peng Qin-ke, Li Jing, et al. USVM: Selection of SNPs in diseases association study using UMDA and SVM [C] // 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering. 2010
- [15] Speed D, Balding D J. MultiBLUP: improved SNP-based prediction for complex traits [J]. Genome Research, 2014, 15, 24(9): 1550-1557
- [16] Wei Bin, Peng Qin-ke, Li Chen-yao. A Hybrid of Binary Particle Swarm Optimization and Estimation Distribution Algorithm for Feature Selection [C] // 6th International Conference on Natural Computation. 2010: 2510-2514
- [17] Sluga D, Curk T, Zupan B, et al. Heterogeneous computing architecture for fast detection of SNP-SNP interactions [J]. BMC Bioinformatics, 2014, 15: 216-222