

地理模拟优化系统 GeoSOS 软件构建与应用*

黎夏, 李丹, 刘小平, 劳春华, 张亦汉, 何晋强, 黄康宁
(中山大学地理科学与规划学院, 广东 广州 510275)

摘要: 在提出的地理模拟优化系统概念的基础上, 进一步构建了整合的软件系统 GeoSOS, 以解决地理信息系统(GIS)目前在对过程分析存在功能不足的难题。作为 GIS 的重要扩展, 该系统由 3 个重要模块组成: 地理元胞自动机(CA)、多智能体系统(MAS)和生物智能(SI)。地理元胞自动机模块包含了常用的 CA 模型, 包括 MCE-CA, Logistic-CA, ANN-CA, Decision-tree CA 等, 为用户提供了一种选择最佳模拟模型的方便环境。GeoSOS 能根据训练数据, 自动获取最佳的模型参数。该系统还将 MAS 和 SI 引进模型中, 提高了对复杂地理过程进行分析的能力。另一特色是具备了将模拟和优化耦合的能力, 由此能大大改善模拟优化的结果, 为复杂的资源环境模拟和优化提供了强有力的过程分析工具。

关键词: 地理模拟优化系统; 地理元胞自动机; 多智能体系统; 生物智能; 耦合

中图分类号: P96; TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2010) 04-0001-06

The Implementation and Application of Geographical Simulation and Optimization Systems (GeoSOS)

LI Xia, LI Dan, LIU Xiaoping, LAO Chunhua, ZHANG Yihan, HE Jinqiang, HUANG Kangning
(School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: This study has developed the platform for Geographical Simulation and Optimization Systems (GeoSOS). The objective is to improve the limitations of current GIS on process analyses. GeoSOS consists of three major integrated components, cellular automata (CA), multi-agent systems (MAS), and swarm intelligence (SI). This system is equipped with common CA algorithms, such as MCE-CA, Logistic-CA, PCA-CA, ANN-CA, and Decision-tree-CA. This system can automatically obtain transition rules according to data mining techniques. The incorporation of MAS and SI can help to solve a variety of complex geographical simulation and optimization problems. Another novelty of this proposed system is its capability of coupling simulation models with optimization models. Experiments have demonstrated that this coupling strategy can yield more satisfactory modeling results under complex changing environments.

Key words: geographical simulation and optimization systems, geographical cellular automata, multi-agent systems, swarm intelligence, coupling

地理信息系统(GIS)已经被大量地使用在资源环境管理的辅助决策中, 但 GIS 在模型方面功能较弱, 不能满足地理学家对过程分析方面的需求^[1]。许多地理现象的演变具有复杂的非线性系统特征, 无法利用单纯的基于方程式的方法来有效

研究。传统方法很难模拟复杂地理系统所具有的涌现、无序到有序、波动式发展等现象, 以及分析复杂的人-地关系, 探讨各子系统的协同作用, 挖掘演变的空间分异规律, 并对空间布局进行动态优化(例如基础设施选址和土地利用空间分布等)。随

* 收稿日期: 2010-03-30

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(40830532); 国家杰出青年基金资助项目(40525002)

作者简介: 黎夏(1962年生), 男, 教授, 博士生导师; E-mail: lixia@mail.sysu.edu.cn

着海量空间数据的收集, 地理学家开始建立更复杂的模型, 包括对地理过程进行分析。地理学家需要对复杂多变的资源环境进行分析, 涉及到“从下至上”和不确定 (non-deterministic) 的模型。GIS 进入了需要更多高级分析和决策支持工具的时代^[2]。

近 20 多年的研究表明, 元胞自动机和多智能体系统模型是对复杂地理系统进行分析的重要工具之一^[3]。基于元胞自动机的城市模拟方面已经取得了重要的进展, 包括建立了 SLEUTH-CA^[4]、MCE-CA^[5]、Logistic-CA^[6]、ANN-CA^[7]、Decision-tree-CA 等模型^[8]。但是, 这些研究都是孤立地进行, 没有给用户提供一个实用的模拟系统平台。因此, 我们提出在地理模拟优化系统的原型^[9], 把元胞自动机, 多智能体系统和人工智能等统一在地理模拟系统的框架中, 以提高和扩展地理模拟系统的能力。地理学的研究对象是十分复杂的, 一般的 GIS 分析功能已经不能满足复杂的地理计算的要求。有需要提出和发展地理模拟与决策支持系统的理论体系, 将元胞自动机、多智能体和生物智能统一在同一个研究框架内, 以解决当前 GIS 对地理复杂系统过程分析能力较弱的问题。地理模拟优化系统将是 GIS 的重要拓展, 弥补了传统 GIS 过程模拟能力的缺陷。

本研究目的是进一步建立地理模拟优化系统 GeoSOS 软件, 为城市化地区空间管制与土地利用等方面的引导、调控和优化提供技术支撑平台。通过将生物智能引进 GIS, 以解决复杂的资源环境空间优化问题。本系统提供了完整的自下而上的城市扩张和土地利用模拟的 CA 模型, 以及在高维空间下的点、线和面的智能优化模型。

1 GeoSOS 平台功能及特色

本系统的开发采用了面向对象的编程语言, 在 Microsoft .NET 2.0 和 C# 语言环境下实现了平台的各种功能 (GeoSOS 免费版本可以在 www.geosimulation.cn 下载)。本系统的特点具有自主知识产权, 完全独立于任何现有的 GIS 软件。通过完整地将元胞自动机 (CA)、多智能体 (MAS) 和生物智能 (SI) 整合在统一的平台下, 提供了对复杂地理现象 (包括城市扩张、土地利用变化、沙漠化、生态环境演变等) 进行模拟、预测与优化的功能。GeoSOS 包括了几大功能组件, 图 1 显示了这些功能组件以及它们之间的相互关系。

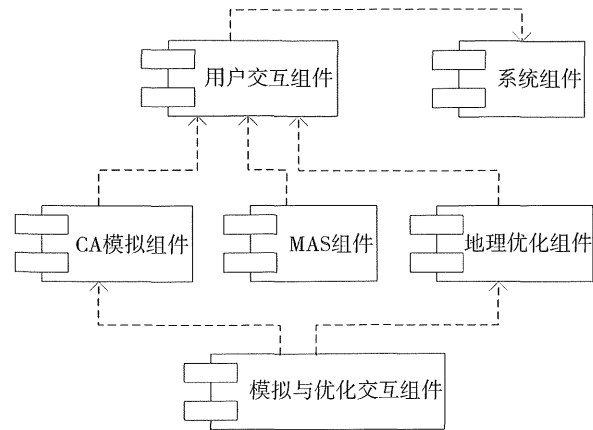


图 1 地理模拟系统功能组件图

Fig. 1 Software components of GeoSOS

1.1 用户交互组件

用户交互组件提供系统和用户的交互功能, 即获取用户的输入信息和输出系统信息给用户。具体包括如下内容:

1.1.1 数据输入和加载 该组件读入空间数据及配置信息, 为下一步的数据分析做好准备。可允许用户直接输入或导入从其它 GIS 数据源输出的空间数据。目前 GeoSOS 需要事先利用常用的 GIS 功能将有关空间数据转换为 ASCII 码的交换文件才能输入 (将来允许直接读入 ArcGIS 的 Shape files 格式)。可以利用 ArcGIS 的 GRIDASCII 命令将 Grid 数据转换为 ASCII 码文件。通过该组件将有关空间数据加载到 GeoSOS 中, 作为系统各模型的输入数据。

1.1.2 数据显示 将系统中的原始图像数据 (如遥感数据) 和模拟结果以可视化的方式显示出来, 供用户直观浏览。有关文本数据使用文本的形式表现出来, 其它数据 (如模拟中的中间成果数据) 可以通过可视化控件动态的展示出来。

1.1.3 数据输出 系统可以将分析过程中产生的数据和分析结果输出为图像、文本或其它形式, 供用户使用。系统还可以提供打印、导出为外部数据等功能。

1.2 地理元胞自动机 CA 组件

GeoSOS 包含了常用的 CA 模型, 包括 MCE-CA^[5]、逻辑回归 CA^[6]、神经网络 CA^[7]、基于数据挖掘 CA 等^[8]。将这些常用模型整合放在模型库中, 可以方便用户灵活调用这些模型, 并对比这些模型在某一地区的应用效果, 以便快速找到合适的模型。在本系统中, 这些 CA 组件主要包括以下功能:

1) CA 转换规则提取。系统提供多种自动获取转换规则的方法,利用真实(实际)数据(一般是分类后的遥感数据)来纠正模型。系统提供了模型参数校准和精度验证等功能,以使得模拟的结果更接近真实情况。

2) 模拟与预测。根据提取的转换规则进行有关地理现象(城市扩张、土地利用变化、景观动态等)的模拟与预测。系统将根据当前的转换规则和输入数据,进行未来发展趋势的模拟。当达到某一预设的条件后,就完成预测过程。随后可以用相关功能对预测结果进行分析。

在模拟预测过程中系统可以提供实时的变化数据,以图形可视化和文本的方式同时呈现给用户,以方便用户掌握实时变化的过程。在土地利用变化模拟过程中,系统可产生不同土地利用类型的实时转化曲线,以反映城市发展的演变过程。

3) 模拟分析评价。将模拟和实际的格局进行对比和评价,以检验模拟的有效性。系统提供模拟效果分析和评价的工具,例如利用逐点对比评价方法。用户也可根据评价结果调整转换规则的参数,再次进行模拟实验,经过多次循环试验,最终获得最优的转换规则。

4) 模型对比。对于 CA 转换规则的提取,目前已有许多成熟的研究。针对某一特定的研究区域,可能某一种模型能取得最佳的模拟效果。本系统将提供模型之间模拟效果的对比功能,由此可找到最合适的模型。

1.3 多智能体系统模拟组件

通过微观智能体之间及其与周围环境间的相互作用,结合元胞自动机,可以更好的自下而上模拟出地理现象的变化。因此,基于多智能体系统的模拟主要包括以下功能:

1) 多智能体及定义。Agent 是在虚拟环境中具有自主能力、可以进行有关决策的实体。在不同的地理模拟环境中,需要定义不同的智能体及其决策行为。系统将提供定义多智能体的工具,由用户确定具体地理环境下的智能体实体和行为。

2) 基于多智能体系统的模拟。基于多智能体系统的模拟将利用多智能体系统和 CA 结合进行地理现象的模拟。系统根据定义的多智能体的实体和行为,并结合 CA 进行模拟和预测涉及人-地关系的地理现象。前者涉及到使用社会经济数据(统计数据),后者需要使用自然要素数据(GIS 空间数据)。

3) 模拟分析评价。在使用多智能体与 CA 结

合进行模拟或预测后,也要对模拟的结果进行对比和评价,检验模拟的效果。系统同样将提供类似 CA 模拟的模拟分析结果评价功能。

1.4 空间优化功能组件

该组件是在计算机环境下完成复杂的空间优化功能。GeoSOS 集成了蚁群智能优化算法(ACO)来获得这种空间优化的能力,以解决基础设施选址、道路选线等空间优化难题^[9-10]。通过改进 ACO 算法,本系统提供了完整的点、线和面优化的模型。用户可以输入各种真实的空间数据(例如适宜性)作为优化的背景,从而生成空间优化方案。系统提供良好的用户接口,方便进行优化参数的设置,并将优化结果进行输出和应用到其它模型中。

GeoSOS 的一大特点是可以将地理模拟和优化有机、无缝地结合起来,使这两个不同模块所产生的结果能够互相调用。例如城市模拟(城市扩张和土地利用变化模拟等)结果可以作为空间优化(道路选线和生态保护区选址等)的重要输入数据,从而达到动态优化的目的。同样,空间优化的结果也可以进一步影响城市扩张和土地利用变化。本统一平台为这两种模型的耦合在功能层次提供了技术支持,使用户可以方便地进行交互操作,完成复杂的地理模拟优化任务。

2 应用

从 GeoSOS 网站(<http://www.geosimulation.cn>)下载 GeoSOS 的最新版本,目前最新版本为 1.2 版。主界面主要包括:主菜单,工具条,工作区,图例窗口,输出窗口,图表窗口等组成(图 2)。

下面以生态保护区优化选址为例,以显示 GeoSOS 在复杂的城市模拟和空间优化方面的强大能力。随着中国城市化进程的加剧,城市不断扩张,由此带来了一系列的环境问题,包括耕地和生态用地的不断减少,环境质量下降等。将一部分重要的生态用地划入保护区,可以减少城市化所带来的不良影响。生态保护区具有多种用途,包括保护物种和保持生态多样性,进行旅游和休闲活动,开展科学研究等^[11]。近年来,在珠江三角洲两个城市化非常高的城市,深圳和东莞,已经立法强制要求建立生态控制线或生态保护区,以合理地利用有限的土地资源。

目前国际上缺乏采用空间优化的方法来形成生态保护区的研究,国内基本是采用人工方法来划定生态保护区,无法获得最优的效果。现有 GIS 也不

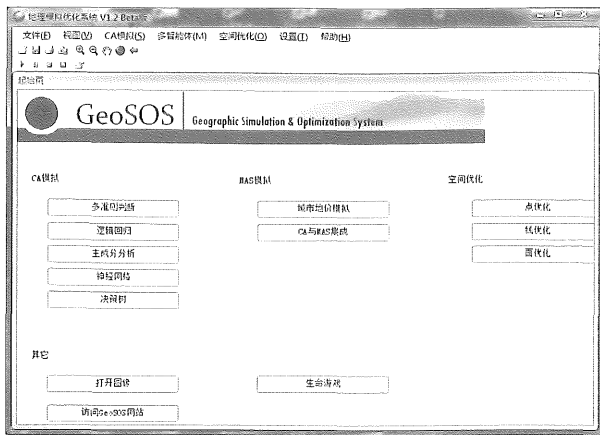


图 2 GeoSOS 1.2 系统界面及主要功能
Fig. 2 System UI of GeoSOS 1.2

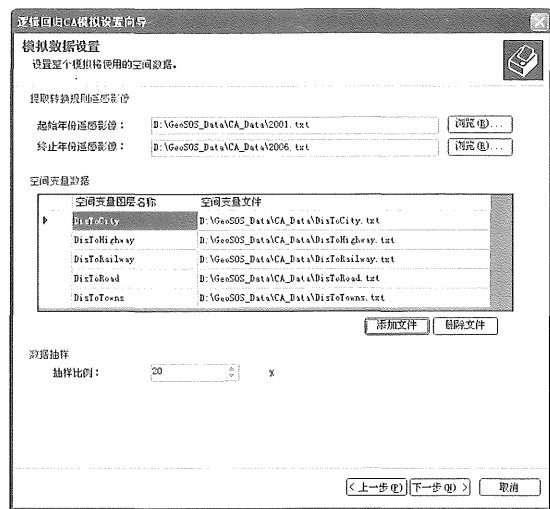


图 3 定义逻辑回归 CA 模型的空间变量
Fig. 3 Defining spatial variables for implementing Logistic-CA

提供有关的优化功能, 其普遍使用的选址功能无法产生最优的方案, 特别是针对点、线和面的优化。生态保护区的划分涉及面状地物的优化, 属于典型的高维空间的 NP 优化难题。通过改进蚁群算法 (ACO), GeoSOS 提供了有效的面积优化模块, 为生态保护区的划定提供了一种十分方便的工具。

在城市化迅速的地区, 生态保护区的划定还需要考虑到城市增长的需要, 要适当的给城市发展预留一定的空间。有必要将城市模拟与面积优化两者耦合起来, 这种基于动态的优化方案将比静态的优化方案更有优势。本生态保护区优化生成包括 2 个步骤: ①模拟出规划期间可能的城市扩张情况, 将其作为下一步优化的因素之一; ②利用 GeoSOS 中的 ACO 面优化模块寻找最优的生态保护区方案。

以东莞的生态保护区生成为例, 即需要从空间上最优地找到满足一定面积总量的保护区分布位置。根据规划要求, 东莞的城市用地、生态用地和后备用地的总量比例为 4:4:2, 故需要从该市选择 880 km² 土地作为生态保护区。优化模型所用到 grid 数据的大小为 193 × 133, 分辨率为 400 m。

首先采用逻辑回归 CA 模拟城市扩张的情况, 步骤如下: ① 点击【逻辑回归 CA】, 系统将打开向导页; ② 直接点击【下一步】进行训练数据设置。选择时间 1 和时间 2 的遥感分类数据, 作为城市扩张的因变量, 并定义影响城市扩张的空间自变量 (图 3)。设置训练数据随机抽样的比例。系统将根据逻辑回归方法自动获取 CA 模型的参数; ③ 进一步设置有关模拟的约束参数, 例如以转换总量控制模拟的终止条件, 最终获得东莞城市扩张的模拟结果 (图 4)

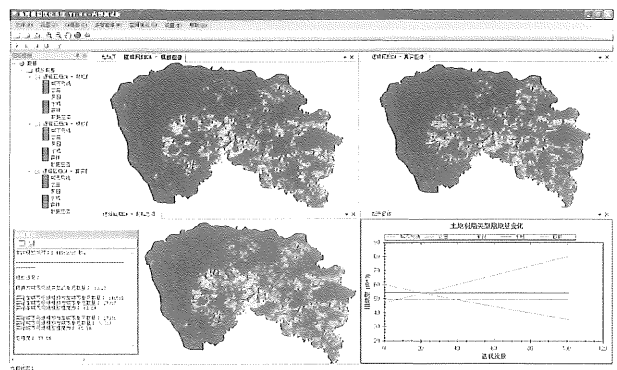


图 4 东莞城市扩张的模拟结果
Fig. 4 Simulation of urban expansion of Dongguan

然后根据城市模拟的结果, 进行基于蚁群优化的生态保护区划定。在蚁群优化每一步的迭代中, 一个蚂蚁选择栅格的依据是目标函数。本目标函数包括了 2 部分: 生态保护适宜性和紧凑性。其中, 紧凑性保证所产生的生态保护区具有一定的连续性。目标函数的公式如下:

$$GoalFunction = EcoSuitable \times Compactness \quad (1)$$

其中, *GoalFunction* 为目标函数, *EcoSuitable* 为生态保护区适宜性, *Compactness* 为紧凑性。

需要定义具体的生态保护适宜性函数 *EcoSuitable*。本文考虑生态保护区的影响因子有城市发展适宜性 *UrbanSuitable*, 归一化差异植被指数 *NDVI*, 改进的归一化差异水体指数 *MNDWI*, 城市发展密度 *UrbanDensity*, 地形起伏度 *Relief Amplitude* (物种多样性), *NDVI* 在一个移动窗口内的差异 (植被多样性)。打开自定义适宜性窗口 (图 5), 单击“+”按钮, 添加上面所述的空间数据,

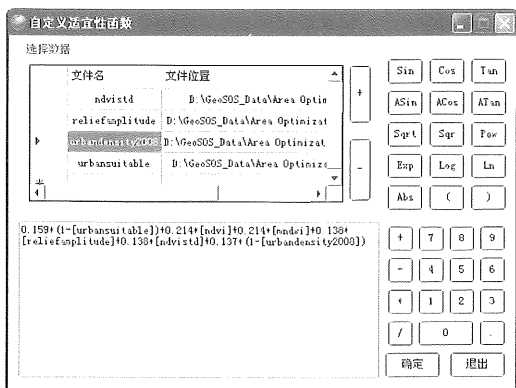


图 5 在窗口输入适宜性函数的数学表达式

Fig. 5 Defining formula for the suitability of ecological protection

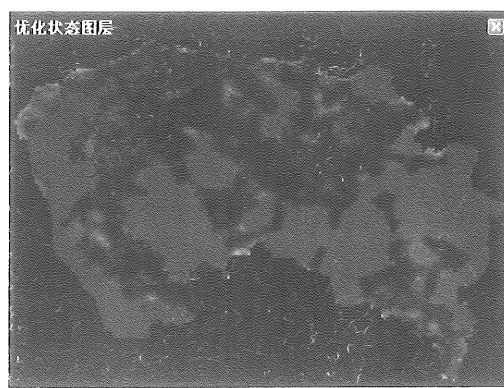


图 7 生态保护区的最终优化分布

Fig. 7 Final optimized distribution for ecological protection areas

并对每个因子分别给予不同的权重。在窗口输入适宜性函数的数学表达式：

$$\begin{aligned} SuitabilityFunction = & 0.159 \times (1 - UrbanSuitable) \\ & + 0.214 \times NDVI + 0.214 \times MNDWI \\ & + 0.138 \times reliefamplitude + 0.138 \times NDVISTd \\ & + 0.137 \times (1 - UrbanDensity) \end{aligned} \quad (2)$$

单击“确定”按钮执行适宜性计算，并返回模块主界面设置 ACO 参数。需要得到的生态保护区为 $880 \times 10^6 \div (400 \times 400) = 5\ 500$ 个栅格。选择“紧凑性”并开始运行面优化模型。图 6 为基于 ACO 模型的生态保护区生成的初始分布，基本是呈随机的凌乱布局。随着模型中每个人工蚂蚁的相互合作，最终形成优化的生态保护区布局（图 7）。其效果是非常理想的，由此能避免常规方法所涉及的繁重工作，并使得所制定的生态保护区更有科学性。

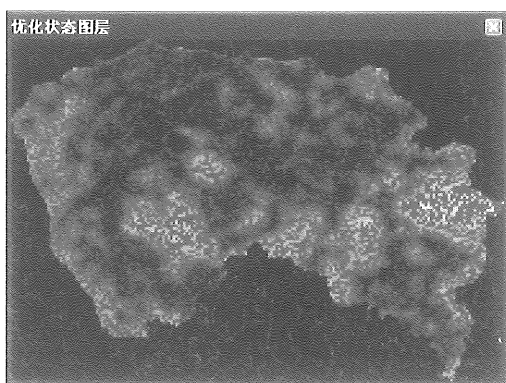


图 6 生态保护区的初始分布

Fig. 6 Initial distribution for ecological protection areas

3 结 论

尽管 GIS 已经在众多的行业有广泛的应用，但目前 GIS 在模拟和优化方面的功能是十分薄弱的，无法对复杂的资源环境系统进行深入的分析，包括对过程进行模拟和优化。本文采用了面向对象的编程语言，在 Microsoft .NET 2.0 和 C# 环境下实现了地理模拟优化系统 GeoSOS 的各种功能，并在网站上公开发布该软件 (<http://www.geosimulation.cn>)，以促进地理模拟优化系统的发展，改善目前 GIS 在过程分析方面的严重不足。

首先 GeoSOS 集成了目前国际上流行以及我们建立的 CA 模型，包括 MCE-CA, Logistic-CA, ANN-CA, Decision-tree CA 等，为用户提供了一种方便的模拟分析环境。同时 GeoSOS 首创地提供了强大的点、线和面优化的功能。通过改善蚁群算法，使得其适合复杂的空间优化任务。而且，GeoSOS 提供了实现地理模拟和空间优化耦合的平台，可解决复杂多变资源环境下的动态优化难题。

本研究将 GeoSOS 应用于快速增长地区的生态保护区优化研究中，以东莞城市为例，说明了该系统能方便和有效地形成生态保护区。采用所提出的方法，可以提高目前生态保护区划定的科学性。由此可为中国的快速城市化地区的生态保护提供了有用的分析工具。将城市模拟和城市规划有机联系起来，使得城市模拟的结果，作为生态控制线制定、交通线路设计、土地利用规划和人口容量估算等的重要依据，能提高城市规划的前瞻性和科学性。

(下转第 15 页)

- ser scanner [C]//Computer Vision Approaches to Medical Image, 2006:37-48.
- [3] XIE Z X, WANG J G, JIN M. Study on a full field of view laser scanning system [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, 47: 33-43.
- [4] 郝继贵, 王大为, 王鑫, 等. 光学坐标测量系统中的关键技术 [J]. 红外与激光工程, 2007, 36 (3): 296-299.
- [5] WANG Z Y, LI H W, LI D P, et al. A direct calibration method for structured light [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics & Automation Niagara Falls, 2005: 1283-1287.
- [6] 徐德, 王麟琨, 谭民. 基于运动的手眼系统结构光参数标定 [J]. 仪器仪表学报, 2005, 26 (11): 1101-1105.
- [7] 李清泉, 王植, 李宇光. 基于线结构光的3维目标测量与多分辨率建模 [J]. 测绘学报, 2006, 35 (11): 371-378.
- [8] FENG T, LI X, JI G, et al. A new laser-scanning sensing technique for underwater engineering inspection [J]. Artificial Intelligence in Engineering, 1996, 10 (4): 363-368.
- [9] ROGERY T. An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision [C]//IEEE Conference of Computer Vision and Pattern Recognition, 1986: 364-374.
- [10] 丁建军, 蒋庄德, 李兵, 等. 线结构光扫描测头误差分析与补偿方法 [J]. 西安交通大学学报, 2008, 42 (3): 286-290.
- [11] 熊会元, 宗志坚, 陈承鹤. 线结构光条纹中心全分辨率精确提取方法 [J]. 光学精密工程, 2009, 17 (5): 1057-1062.
- [12] XIONG H Y, XU Y, ZONG Z J. Accurate extrinsic calibration method of line structured-light sensor based on standard ball [C]//IST 2009 International Workshop on Imaging Systems and Techniques Proceedings, 2009: 193-197.

(上接第5页)

参考文献:

- [1] GAHEGAN M. What is Geocomputation? [J]. Transactions in GIS, 1999, 3(3): 203-206.
- [2] GOODCHILD M F. Geographical information science [J]. International Journal of Geographical Information Systems, 1992, 6:31-47.
- [3] 黎夏, 叶嘉安, 刘小平, 等. 地理模拟系统: 元胞自动机与多智能体 [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 250-258.
- [4] CLARKE K C, HOPPEN S, GAYDOS L. A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area [J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 1997, 24: 247-261.
- [5] WU F, WEBSTER C J. Simulation of land development through the integration of cellular automata and multicriteria evaluation [J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 1998, 25: 103-126.
- [6] WU F L. Calibration of stochastic cellular automata: the application to rural-urban land conversions [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2002, 16: 795-818.
- [7] LI X, YE H A G. Neural-network-based cellular automata for simulating multiple land use changes using GIS [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2002, 16: 323-343.
- [8] LI X, YE H A G. Data mining of cellular automata's transition rules [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2004, 18: 723-744.
- [9] 黎夏, 刘小平, 李丹, 等. 基于耦合的地理模拟优化系统 [J]. 地理学报, 2009, 64(8): 1009-1018.
- [10] LI X, HE J Q, LIU X P. Intelligent GIS for solving high-dimensional site selection problems using ant colony optimization techniques [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2009, 23(3/4): 399-416.
- [11] LI X, HE J Q, LIU X P. Ant intelligence for solving optimal path-covering problems with multi-objectives [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2009, 23(7): 839-857.
- [12] VERDIELL A, SABATINI M, MACIEL M C, et al. A mathematical model for zoning of protected natural areas [J]. International Transactions in Operational Research, 2005, 12: 203-213.