

# 一种基于 MAS 和 GIS 平台的 城市人口变迁模拟仿真方法

危 辉<sup>1,2</sup>, 白 宇<sup>1,2</sup>

(1 复旦大学 计算机科学与工程系认知算法模型实验室, 上海 200433; 2 复旦大学 波散射与遥感信息教育部重点实验室, 上海 200433)

**摘 要:**中国的城市化进程非常迅速,人口增长和迁移是重要特征之一.以地理信息系统、Multi-agent 系统和随机过程为基础,建立一个研究人口增长的仿真模型.首先,利用 GIS 建立一个数字环境,用效能函数的概念在 GIS 中表示各类资源的效能.其次,详细阐述了一个 Multi-agent 系统设计和实现,重点是用 agent 代表某个地块及其属性和行为设计.由于发展的不确定性,设计了一个基于随机过程的行为模型,这也和 agent 宏观水平上的特性一致.最后,以上海市浦东新区为对象,进行了实验模拟和分析.结果表明这个基于 Multi-agent 系统和 GIS 的人口变迁仿真模型,具有模块性和可扩展性方面的优势,可应用到其他的城市规划研究中去.

**关键词:**复杂系统仿真; Multi-agent 系统; 城市化模型

**中图分类号:** TP18 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-4785(2009)01-0044-15

## Simulation of urban population growth with a multiagent system and GIS platform

WEI Hui<sup>1,2</sup>, BAI Yu<sup>1,2</sup>

(1. Laboratory of Algorithm for Cognitive Model of Department of Computer Science, Fudan University, Shanghai 200433, China; 2. Key Laboratory of Wave Scattering and Remote Sensing Information (MOE), Fudan University, Shanghai 200433, China)

**Abstract:** The Chinese economy grew rapidly for more than 20 years, promoting rapid urbanization. New cities emerged and great changes took place in old cities. Population changes complicated city planning, infrastructure construction, housing, and environmental preservation. A model simulating this population transformation was built merging methods from Geographical Information Systems, Multi-agent Systems and Stochastic Processes. First an efficiency function was proposed to represent the effectiveness of a resource within the GIS. Second, a multi-agent system was designed and implemented, with agents representing ground segments and profits acquired after that. Third, static attributes and dynamic behaviors of agents were discussed. To model the uncertainty of urban development better, a behavioral mode was designed based on a stochastic process, consistent with macro-level characteristics of the agent. The combined system and its implementation in a computer were then discussed. Finally experiments, using data from Pudong District of Shanghai, were run and analyzed. This urban evolution model can be adapted to more types of research and owes its good performance to modularity and scalability.

**Keywords:** system simulation; multi-agent system; urban modeling

一些发展中国家经济的快速增长,工业结构的调整和持续增长的城市化速度,使得人口向城市和城市的边缘地区迁移的速度明显加快了.人口的增长对房屋、道路、公共服务设施和能源等等的供应提出了新的要求,虽然对于投资者而言这增加了很多

商业契机,但是同时也增加了就业、环保、政府管理等方面的压力.因此,对于政府管理者、政策制定者、投资者和提供服务者而言,研究地区人口变化有很重要的意义.影响人口迁移的因素很多,因此建立一个有统计意义并且可以模拟人口变化的数字化城市模型是一大挑战.而且对这样的模型稍加改造,就可以用来研究和城市发展与规划相关的其他问题.

已经有很多方法被用于城市化建模.早期的模

收稿日期: 2007-09-15.

基金项目: 国家 973 计划资助项目 (2001CB309401); 国家自然科学基金资助项目 (60303007).

通信作者: 危 辉. E-mail: weihui@fudan.edu.cn

型大多是静态的,包括很多重空间交互的模型。因为缺乏时间维的概念,这样的模型只能表示空间对象的分布和它们的交互,而不能反映城市化的动态过程。现在大多数研究者把注意力集中在动态模型上,所有这些方法通常可以归为两类。第一类是采用自顶而下的宏观方法。这类模型包括系统动态模型<sup>[1-4]</sup>,它们基于微分方程和统计模型<sup>[5-14]</sup>,通常用于某些社会经济(socio-economic)指数的分析。因为没有考虑城市的微观结构和个体行为,所以它们不能真正反映城市空间结构的变化。第二类是自底向上的方法,即建立在人工神经网络<sup>[15-16]</sup>、分形<sup>[17-19]</sup>、细胞自动机、agent等的基础上的离散的动态模型。在这些技术中,细胞自动机和 agent 尤其值得注目。Tobler<sup>[20]</sup>首先应用细胞空间模型模拟底特律的城市发展。在他的影响下,Couclelis<sup>[21-23]</sup>对细胞自动机应用于城市发展建模的优点给出了充分的理论论述,确立了自胞自动机应用于城市发展研究的基础。Phipps等人<sup>[24]</sup>通过对 Cell Automata 模型和并行过程间的关系进行分析并讨论了并发动态系统,提出了模拟城市土地利用的 Thünen模型。Benati<sup>[25]</sup>以市场上多个店主的空间竞争模型为例阐述了市场的进化模式和自组织间的一致性。White等人<sup>[26-27]</sup>通过定义一个包括工业、商业、住宅区、道路和河流的多状态集,建立起了基于细胞自动机的模型。他们成功地仿真了亚特兰大和辛辛那提土地利用的空间不规则碎片模式,以此揭开地形通过道路网影响城市形态的人与土地间的机制。接着他们建造了 GIS (geographical information system) 系统内的宏观的空间模型和一个包含自然和人工子系统的动态集成模型。

基于 Multi-agent 系统的模型更注重于一些活跃的、宏观的 agent,如人群和社会团体。所有的 agent 和它们之间的交互作用被用来模拟宏观现象的演变过程。Batty 与 Jiang 等人<sup>[28-29]</sup>开发了一个虚拟城市系统,其中有很多个体 agent,模拟人流和运输流讨论城市结构对人们行为的影响。Benenson 等<sup>[30-31]</sup>把一个家庭作为一个个体,建立了 Tel-Aviv 城 YAFFO 地区的人口分布模型,利用高性能并行计算机仿真城市环境和对居民搬迁的动态模拟。他们仅仅分析了城市空间结构和人群分布的关系,而没有考虑其他诸如工作分布的因素。在将 MAS (Multi-agent system) 与 GIS 相结合方面也有新的进展。如利用 MAS 进行城市拓展研究<sup>[32-33]</sup>,进行生态学研究<sup>[34]</sup>,进行城市公共交通研究<sup>[35-37]</sup>,进行环境保护研究<sup>[38-39]</sup>,基于 Web 的 GIS 应用研究<sup>[40-41]</sup>,进行电力网络的故障诊断研究<sup>[42]</sup>等。

## 1 仿真系统结构

为了使模拟更加可信,需要处理几个问题。第一是要建造一个虚拟环境,这个数字的环境应该包括尽可能多的对人们的行为产生影响的方方面面。第二是要设计一些与人们的行为近似的响应行为模型。由于人们的个体特征差异十分重要,基于特征多样性的行为多样性是模型设计的目标。第三是行为模型中人工智能技术的运用。因为行为的核心是基于知识的决策过程,所以行为模型需要推理、计划和问题求解等具有智能的行为能力。图 1 展示了模拟系统的框架结构,它是一个自然环境和人工环境的复合体,人们通过这个复合的环境彼此影响。

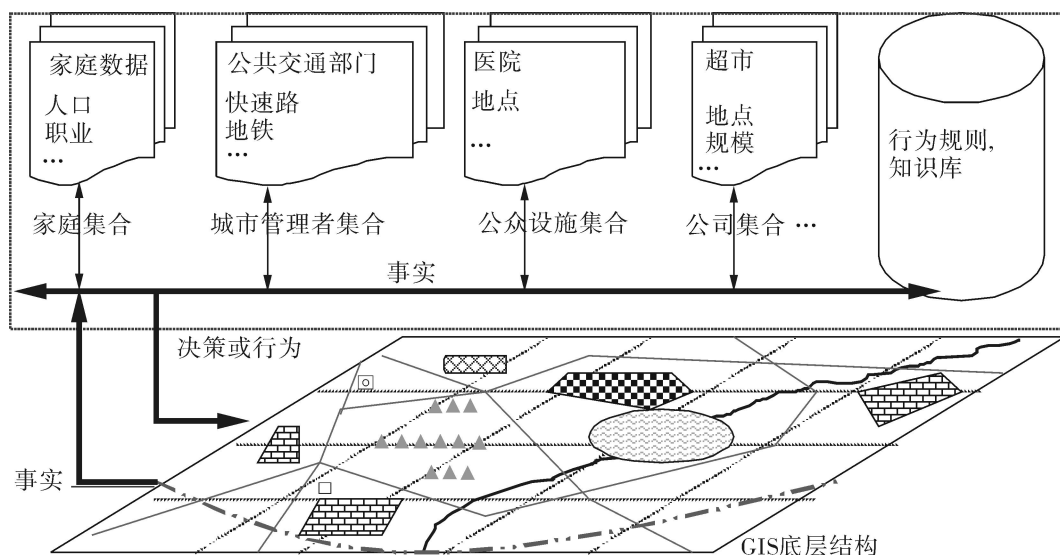


图 1 仿真系统结构

Fig 1 The structure of simulation system

## 2 城市公共设施分布的 GIS表达

### 2.1 城市相关面貌布局的 GIS表示

城市是一个庞大而又复杂的复合结构. 所有自然和人工的客体构成了一个本地的静态环境, 这些在我们对环境进行模拟时都要考虑到. GIS平台专门表达这些空间位置相关的物体, 根据属性和功能把它们分成不同的类别, 例如所有的学校按照坐标定位于电子地图的教育图层, 所有的高架路、地铁和轻轨则属于交通图层. 很多 GIS的教材都讨论了怎样设计和建造一个图层, 这里略去.

本文的目的是设计一套系统的方法来预测和检验由于人口数量的改变, 环境的改变和经济的发展而引起城市面积扩展在不同方面的效果. 实验的结果应该对投资者和管理者有一些借鉴意义. 在本研究目标下需要考虑的主要因素都是对人口迁移有显著影响的因素, 包括区域面积、人口密度、自然环境、住宅数量与分布、就业岗位数量与分布、交通设施的里程与分布、教育机构的分布、各类服务设施的数量与分布、城市功能分区的布局等. 所有这些因素都可以显性地表示在 GIS系统中.

### 2.2 各种资源效能函数的定义

影响人口迁移的因素有很多, 如道路网络、住房数量、就业岗位数量、生态环境、污染程度、教育设施分布、生活服务设施分布等, 它们都可被视为地理信息系统中管理着的各类资源. 但是值得关注的是这些资源在影响人口迁移的能力方面是不同的, 或者说怎样使这些影响可以计算和量测. 作者发现这类影响能力可以用向量的方向性来表示, 具体来说就是某种资源对于人口迁移和吸引人口的影响能力, 是以资源的空间位置为中心, 具有方向和强度两方面的属性. 这种影响的显著程度被定义为资源的效能函数, 它通常用来计算资源施加于某一点上的影响程度, 即当个体在空间某一点执行某一行为时, 某一资源施加在该点上的影响力. 引入资源效能函数的定义有 3 个显著的好处: 1) 可以精确地描述资源性质对人口迁移的影响; 2) 便于对物理性质差异很大的资源在计算上进行一致性的处理; 3) 使得各类资源综合影响力的叠加简易可行.

根据资源物理尺寸与整个 GIS管辖区域面积的

对比, 可以根据资源所占用的空间形状将它们分为 4 类: 一是点状资源, 如银行、邮局、商店等; 二是线状资源, 如公路、地铁、河流等; 三是面状资源, 如自然风景区、工业区、农业区等; 四是立体状的资源, 如空气污染 (虽然它是一种坏的资源) 等. 各类资源通过恰当定义的效能函数来体现各自影响力的辐射范围和强度.

如前所述, 资源根据其对人口迁移的正面影响和负面影响的的不同, 可将取值分别设为正数和负数. 现在以上海浦东新区为例, 图 2 是几条道路的效能函数量化图. 一条道路的负载能力和一个点靠近道路的程度是计算该道路在该点的效能值的参数, 在图 2 中有一条高速路, 一条地铁和一条世界上首例投入商业运营的磁悬浮线路, 它们的效能曲面很不一样. 图 3 是由包含一个被黄浦江隔断的面状资源 (公园)、若干交通资源、就业岗位资源 (大片的办公区)、若干点状资源 (银行、邮局等) 叠加所形成的复杂曲面, 可见在此区域内是非常适合找一份工作的.

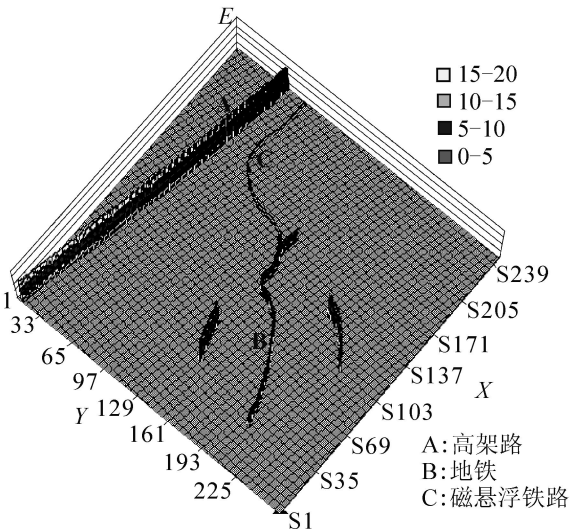
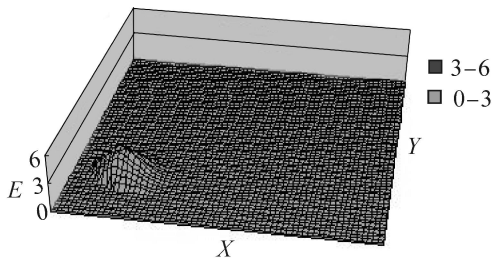


图 2 上海浦东地区几条交通线路的资源效能图

Fig 2 The efficiency map of several main traffic lines in Pudong of Shanghai



(a) 公园或绿地的效能图

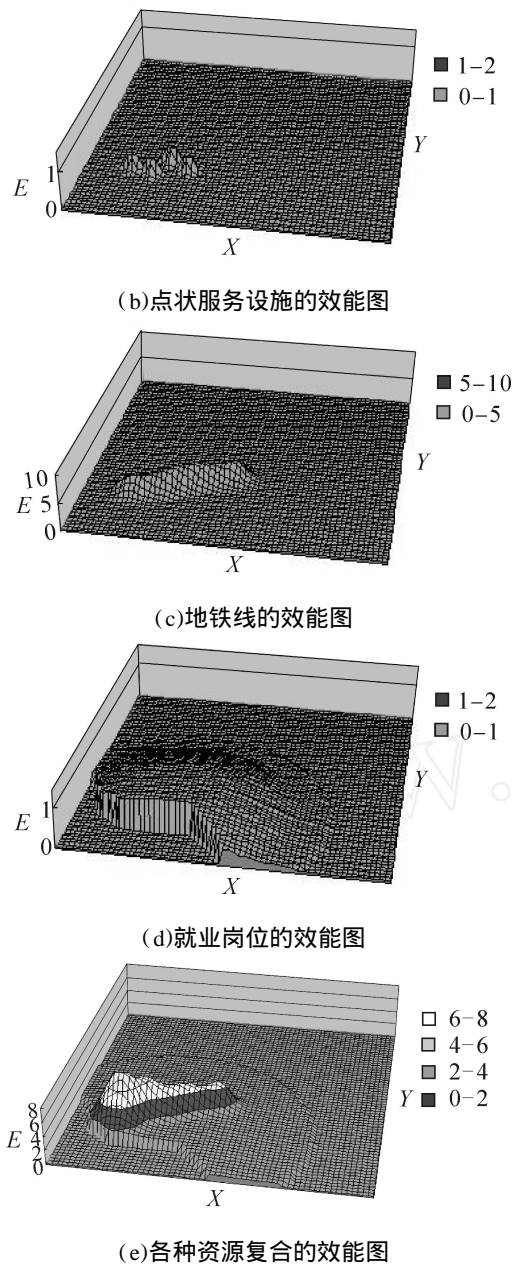


图 3 上海浦东陆家嘴几种资源的符合效能图

Fig 3 A combined efficiency map by several types of resources in Lujiazui of Shanghai Pudong

在模拟城市人口变化或其他类型的城市演变动态过程中,所有资源,无论属于什么种类,被形式化为一个向量,形如 {空间位置, (点状/线状/面状/立体状), 尺寸, 效能函数解析定义/效能空间映射位图, 生效时间, 失效时间}. 所有这些向量是资源简明的索引, 它们组成一个按资源生效时间排序的列表. 显然该列表是可扩展的, 并且由 GIS 平台中嵌入的一个专门模块来管理, 同时该模块也负责唤醒和撤销资源的效能函数. 对于城市发展模拟来说, 在合适的时间启动和停止如此多的资源是非常关键的. 图 4 是上海浦东新区的资源分布图, 不过它只展示了一部分接下来人口迁移模拟实验要用到的资源.

图中包括点状资源、线状资源和面状资源 (由矩形标记).



图 4 上海浦东地区一些资源的分布图

Fig 4 The distribution of a part of resources used in coming simulation experiment

3 模拟系统的 Multi-agent系统设计

城市的多种元素构成了一个动态的系统. 系统中的个体既相对独立又有一定的相关性, 整个城市状态的变化是其中的个体和环境之间复杂的相互作用的结果, 所以构造不同类型的 agent 来为个体及其行为建模是一个好的选择. 由于 Multi-agent 系统并不是对物理世界的完整重复, 仅是一个理论上的抽象, 有一些事实被忽略了, 这会给通过计算机系统进行模拟带来一些困难. 所以在将构造 Multi-agent 系统的过程中必须注意以下几个问题: 1) 可编程性; 2) 可并发性; 3) 环境数据和 agent 状态数据的时序一致性; 4) 存储空间压力; 5) 仿真误差控制; 6) 调度控制模块在概念层次和 CPU 时间片分配层次上的公平性. 基于以上讨论, 接下来设计一个用于城市发展实验的新的 Multi-agent 系统.

3.1 agent 代表的个体

进行用于城市发展模拟的 Multi-agent 系统设计碰到的首要问题是 agent 应该被指代为什么呢? 毕竟有许多可供选择的个体, 如独立的家庭、公司等. 一个最平常的选择是把上面罗列的行为独立个体分别设计成 agent, 只是它们的类型不同, 数量各异. 这样设计在理论上没有任何问题. 但毕竟所有的 agent 和 agent 所生存的环境都是由程序来构造的一个虚拟世界, 由 CPU 的计算和存贮容量来维持, 那么同时处于活跃状态的 agent 一定受到前述两项资源能力的限制. 就当前的问题而言, agent 的数量远超过 CPU 的数量, 因此无论是用单 CPU 的计算机、或是多线程方式、或是并行计算机进行模拟, 其并发性误差或调度公平性问题都是不可忽视的. 例如一个序

号靠前的 agent 总是被先调度到,它代表的是一个家庭,那么它就有可能优先抢占环境中的某些就业岗位资源.另外一个困难的问题在于不同 agent 在属性与行为方面的差异程度.虽然从 agent 模板来看大量的 agent 是相似的,但这种相似仅限于结构框架方面.例如,任何家庭都有家庭成员数量和结构这样两项,但由于成员数量和组成结构的不同而导致在行为决策方面的不同是巨大的,如此大量个体性差异给程序设计带来很大的困难.进一步来看,单个家庭或单个公司对城市演变的影响是非常有限的,单个或少量家庭的迁入或迁出对某一地区影响不显著,迁移原因也不相同.所有这些孤立的事件并不重要,有统计意义的结果才是有价值的.第 3 个困难是 agent 应该由一个控制模块按照不同的时间间隔统一调度. agent 的行为的发生频率是不同的,有些活动像使用交通设施每天都发生,然而像投资行为却几个月都很难发生一次.并且服务设施 agent 总是被动地回应家庭 agent 的要求来提供服务,它们与其他类型的 agent 如家庭 agent 在行为重复间隔方面的区别是它们的间隔很短,甚至每分钟都要做出回应服务要求的行为,比如服务 agent 恰好是一家超市.不同类型 agent 的这种行为频率的差异必将使 agent 控制模块的设计成本成倍增加.

其中最主要的是用 Multi-agents 对时间敏感型过程进行仿真时带来的困难.为实现模拟的有效性而必须解决的问题中最核心的问题是:并发问题(准确模拟真实物理过程中行为的时态相关性)与不一致的数据(环境一致性与时效性问题).这从细节上来看包括:行为模拟、环境模拟、agents 间的协作与竞争、规模可扩展性、同步性、领域知识如何体现、不确定性、事件发生概率的模拟等.

每个 agent 的行为所导致的状态可以用一系列的状态函数表示,比如对第  $i$  个 agent,它是一个描述 agent 不同方面动态特征的集合:

$$\{S_{ij}(t) = f_{ij}(x_1, x_2, \dots, x_n, S_{k1}, \dots, S_{m1}, t), \\ j = 1, \dots, u\}.$$

其中:  $f_{ij}$  为状态描述函数,它不一定是可解析的,可能是一个观察或经验表格;  $x_i$  为影响状态的参数,包括 agent 自身内部与环境参数两部分;  $t$  为时间;  $S_{kl}$  为对该 agent 此刻状态有直接影响的第  $k$  个 agent 的第  $l$  个状态,它本身是  $t$  的函数.

可见,整个 Multi-agents 系统行为的复杂性就取决于状态函数在时态相关性方面的交迭程度.考虑到实际情况下总有相互观察上的时延,对于图 5 所示的一个系统,假设每个 agent 的状态函数集合只

由一个函数组成,则这个系统的状态描述可表示为

$$\begin{cases} S_1(t) = f_1(X, t), \\ S_2(t) = f_2(X, S_1(t - t_{11}), S_5(t - t_{52}), t), \\ S_3(t) = f_3(X, S_4(t - t_{43}), t), \\ S_4(t) = f_4(X, S_1(t - t_{14}), t), \\ S_5(t) = f_5(X, S_3(t - t_{35}), S_4(t - t_{45}), t). \end{cases}$$

其中:  $X$  是由参数组成的向量,  $t_{ij}$  是  $i$  和  $j$  间的观察延迟.假设图 5 中的 agent<sub>1</sub> 完成  $f_1(X, t) = 2x + 2t$ , agent<sub>4</sub> 完成  $f_4(X, S_1(t - t_{14}), t) = x^2 + S_1(t - 1) + t$ , 那么它们的理想状态变化轨迹如图 6 和图 7 所示.

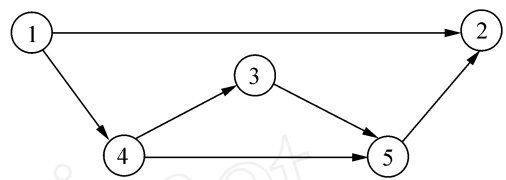


图 5 5 个 agent 间的制约关系

Fig 5 The constraint relationships among five agents

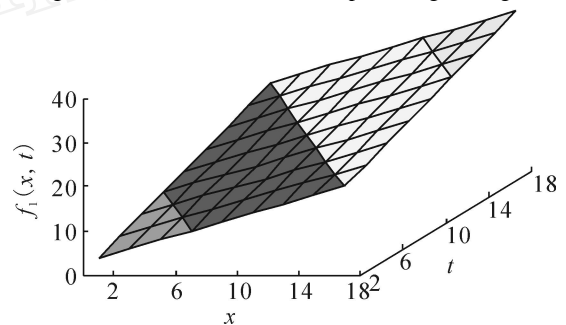


图 6 agent<sub>1</sub> 的状态轨迹

Fig 6 The status track of agent<sub>1</sub>

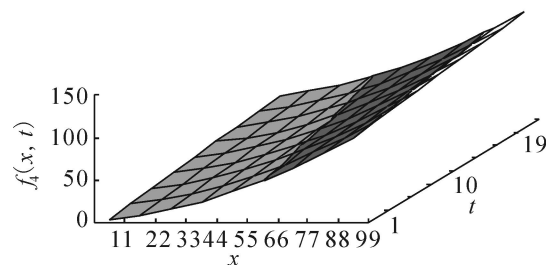


图 7 agent<sub>4</sub> 的状态轨迹

Fig 7 The status track of agent<sub>4</sub>

理论上讲不能期望计算机中 CPU 的数量与 agent 数量能够相等,因此往往通过用一个线程对应一个 agent 的软件模拟的方法来进行整个过程的仿真.这就导致临界区的出现,各 agent 行为间的因果联系会给临界区的访问控制带来很大的困难.因为所有 agent 并非如真实物理系统那样并发执行(且无须同步控制量),而是被分配在不同的时间片内执行,存在某些 agent 提前,同时另一些 agent 滞后

的情况.假设模拟程序以时间  $t$  为控制变量 (概念时间,非 CPU 时间),那么  $f_i(X, S_i(t - t_1), t) = x^2 + S_i(t - 1) + t$  中的  $S_i(t - 1)$  是  $agent_i$  观察  $agent_i$  所得,对应到程序中为一临界内存区.如果代表  $agent_i$  的线程比较复杂,状态更新一次需要在 3 个 CPU 时间片内才能完成,而  $agent_i$  的线程只要一个 CPU 时间片就能完成,那么实际结果是  $agent_i$  访问临界区的频率就太高了.  $agent_i$  得到的轨迹就如图 8 所示,与图 7 相比发生了显著的变化,尤其是从局部范围来看,不但自身内部有累积误差,而且  $agent_i$  的误差还会波及到  $agent_j$ 、 $agent_k$  和  $agent_l$ .

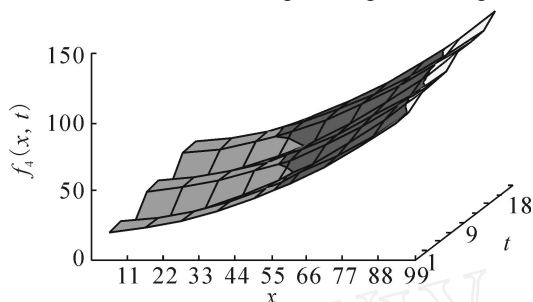


图 8 程序模拟的  $agent_i$  的状态轨迹

Fig 8 The status track of  $agent_i$  simulated by computer program

造成以上欠同步问题的原因在于各个  $agent$  行为的复杂程度不同;其仿真模型在 CPU 上的执行时间也就不同;而操作系统给每个线程所分配的时间片是一样的,因此就有对临界区数据存取时态混乱的局面出现.

综上所述,在城市演化模型中以家庭、公司等细粒度个体为  $agent$  指代的对象在计算实现上是困难的.因此,把  $agent$  设计为地块,它可以包含若干个街区.处于该地块区域范围内的所有人口、住宅区、农田、就业岗位、自然资源等都由这个  $agent$  掌控.因此这样的  $agent$  是一个尺度比较宏观的集合,由于其中的人口和各类资源都达到一定的数量,所以可以从较为宏观的角度来度量  $agent$  行为的后果.以地块区域为  $agent$  的设计可以带来以下便利:

1)  $agent$  的总量得到了有效的控制.以上海浦东新区为例,它常住人口 170 万,家庭数量在 60 万左右,还有大量就业人口,以及超过 1 万家的各类企业或服务机构,不可想象对等设计相同的  $agent$  数量.而以地块为  $agent$  的设计,那么按照浦东新区的  $509 \text{ km}^2$ ,几百个  $agent$  就足够了,仿真压力大大减轻.

2)  $agent$  对真实过程模拟的客观程度得以提高.例如,在以家庭为  $agent$  的设计中,单个家庭  $agent$  在一天之内需要使用多少道路资源、多少公众服务资源等存在极大的个体性差异,任何就孤立事件进

行的估算带有很大的主观性,况且孤立事件的结果对全局的影响是可忽略不计的.相反,以地块为  $agent$  的设计,是以整个地区的人口总量来计算其资源需求的,这使得需求量总能达到一定的基数,这具有统计上的稳定性.

3)  $agent$  行为模式刻画的可信程度得以提高.如果以家庭或企业这样的粒度来构造  $agent$ ,那么为了使得个体的差异性得以充分的表达,必然会使  $agent$  的属性与行为变得复杂和冗长.相反,按照地块划分来定义  $agent$  使得无论在属性抽象还是行为抽象上都可以大为简化,因为在宏观意义下只有集体的属性和行为,它们都是一些统计量和基于统计量的计算.

4) 大大减轻了仿真系统在调度公平性、环境致密性、临界资源竞争方面的压力.以地块粒度为基本单元的 Multi-agent 系统从根本上改变了以家庭和企业粒度为基本单元的 Multi-agent 系统在规模和相互作用方式方面的面貌,由  $agent$  间相互作用的频度所引发的困难自然得到了缓解.

### 3.2 地块 $agent$ 的属性和行为设计

对地块  $agent$  进行详细的设计,包括属性和行为两部分.选择那些对人口迁移有显著影响的因素进行量化描述,包括地块的面积、住宅总面积、人口密度、就业岗位的数量、土地被农业/工业/交通/绿化/办公等不同用途分别占用的比例、交通里程数、基础设施的可用程度、各类服务设施的数量、生态环境状况等,这些都是统计量.如果以家庭为单位来定义  $agent$ ,那么此时  $agent$  的属性必然是成员结构、收入、住宅面积、住宅位置、就业状况、工作或就学地点、受教育程度等,这些都不是统计量.然而一个城市中所有家庭在各项指标类型上必然存在一些分布,为了满足这些分布,在生成家庭  $agent$  个体时就必须刻意控制,由于分布存在某种程度上的相关性,加上需要设定属性值的  $agent$  数量还很多,所以必然会进一步加大生成  $agent$  时控制的难度.一个城市的发展是一个在时间和空间上都有积累的宏观过程,所以选择一个地区为 Multi-agent 系统的最小组成部分,使得人们可以采用对多数个体的长期行为有稳定和确定性影响的统计量作为  $agent$  的属性定义.例如某整个地区所有家庭收入的平均水平和平均居住状况的关联程度是显然的.

真正有意义的是形如“很多人同时上班使交通变得拥挤”这样的事件,单个孤立家庭的上班行为和行被实施的过程并不重要.如果以一个地块上所有家庭为集合来考查其整体行为时,那么行为的

类型就只能是诸如“现在的人口总量对这一地区生活服务设施总量增减的影响”等预测、诱导因素或总体结果的评价行为. 它们往往是地块内与地块间的, 那些对人口变化有影响的因素的在时间和空间范围内的累计效果. 这样的行为在设计上有 3 个巨大的便利: 一是行为模式是计算性的, 比较单一和可操作的; 二是完全避免了琐碎过程的模拟; 三是行为

设计便于在城市实际运行中寻求参考依据.

从面向对象设计的观点来看, 所有 agent 都是独立的对象, 因此面向对象设计中的概念和系统设计原型在这里都是非常有用的. 代表一个地块 agent 的属性和行为的定义见表 1 所示, 其中某些重要行为用函数的形式列出来了.

表 1 agent 的属性和行为定义

Table 1 The definition of agent's attributes and behaviors

agent 的属性		agent 的行为
int	id;	Initialize();
char	code;	ReadDataFromOneRecord();
int	block[MAX_BLOCKS_N_AGENT];	UpdateDataInAgentRecord();
int	b_num;	InBlock(int x, int y, int x <sub>1</sub> , int y <sub>1</sub> , int x <sub>2</sub> , int y <sub>2</sub> , int x <sub>3</sub> , int y <sub>3</sub> , int x <sub>4</sub> , int y <sub>4</sub> );
int	efficiency_function[MAX];	CalculateSquare();
int	e_f_num;	CalculateGroundRatio(int time);
double	square;	WhatRoleAgentPlay();
double	residential_ground;	ResourceStatistic();
double	business_ground;	HowManyPopulationMightResidentHere();
double	greenpark_ground;	HowManyPopulationMightWorkHere();
double	office_building_ground;	PopulationAccumulation();
double	agricultural_ground;	SelectOneAgentRandomly(BOOL new_loop_or_not);
double	industrial_ground;	GetEfficiencyFunctionsAvailableNow(int time);
double	traffic_length;	EfficiencyFunctionBelongingToAgents();
int	public_service;	WriteAgentIntoDatabase();
int	education;	ReadIBlocksFromDatabase();
int	sport_entertainment;	ResidentsFindWorkingPlace(int agent_id);
double	other_ground;	EmployeesFindResidentialPlace(int agent_id);
long	rooms_resource;	ResourceApplyingInAgentOneDayLife(int agent_id);
long	jobs_resource;	SortAgentsByComparativeModemDegree();
int	working_distribute[MAX_AGENTS];	SomeAgentsSelfDevelopment();
int	residential_distribute[MAX_AGENTS];	EvaluateSelfWorth();
int	residential_population;	OnDefineEfficiencyFunction();
int	working_population;	OnDefineAgent();
double	fitness_for_residence;	OnRoadEfficiencyFunctionsAcquisition();
double	fitness_for_work;	OnAgentsAcquisitionResource();
		OnPointEfficiencyFunctionsAcquisition();
		OnPlaneEfficiencyFunctionsAcquisition();

在这个 agent 的定义中, 通过某些行为计算这个 agent 范围内的多种资源, 来估计在城市中 agent 的角色和它能承受的人口数量等等. 很明显, 这些行为都是基于统计数字的.

3.3 agent 行为中的随机过程分析

一个社会观察者所能观察到的是很多个家庭或

企业行为的综合性后果, 对于单次行为的动机和完成过程无法进行全面地跟踪, 同时这样的细节追求对大尺度宏观事件的考察也没有意义, 所以在上一节中为 agent 设计的行为都是关于宏观统计操作的. 例如一个地块 agent 的行为可能是确定在一个时间段内新增加的人口, 如“在以后 3 年内对该区



域住房的需求量会是多少”,这是一个涉及概率的问题.从数学的观点来看,城市区域的扩展是一个非常复杂的随机过程,这个过程观察者从不同的方面看可以由几个不同的概率分布来解释.比如,为了某种原因要搬家的家庭的概率分布是什么,或者每天去超级市场买东西的顾客数量的概率分布是什么等等.所以基于地块设计的 agent 在其行为的实现上大量依赖统计学的计算.下面以住房需求量为例,来精确描述一个行为的实现过程.

假设 AGENT-A 是一个地块 agent, 它的一个行为需要计算住房需求. 随机变量  $N(t)$  表示有意向搬家并且会在第  $t(t=0, 1, 2, \dots)$  天去 AGENT-A 调查情况的人口总数. 这些人的到达是相互独立的.  $N(t)$  的平均值 是一个参数, 很显然同城市中所有家庭的数量比起来, 的值非常之小. 另外用  $p$  表示一个人正好进入 AGENT-A 的范围的概率, 考虑到 AGENT-A 的面积同整个城市的大面积相比只是很小的一个部分, 可以知道这个概率的值是非常小的. 考虑这些是很合理的, 目前的情况显示了泊松 (Poisson) 分布的特征, 也就是说随机变量  $N(t)$  的概率是  $\frac{e^{-N(t)} N(t)^{N(t)}}{N(t)!}$ .

并不是所有到 AGENT-A 去看情况的人最后都会在那里住下来, 更多的情况下这些人中的多数会对 AGENT-A 的某些方面不满意从而放弃这个地方的. 一个人是否决定要住在这个地方是有一定概率的, 这个概率极大程度上依赖于此人的内部因素和 AGENT-A 及其周边地区的外部环境, 这一点是不能被忽略的. 在理论上存在一个实数集  $P^{(A)} = \{p_1^{(A)}, p_2^{(A)}, \dots, p_n^{(A)}, 0 \mid p_i^{(A)} < 1\}$ , 这个序列表示想在 AGENT-A 居住的人的概率. 如何计算这个概率应该服从下面这个常识, 有需求和支付能力就会买或租公寓, 满足于现在的生活水平就不会去买或租公寓. 用这个公式

$$p_i^{(A)} = \frac{I^{(A)} \cdot d_i \cdot a_i}{s_i}$$

来近似这个概率, 其中:  $I^{(A)}$  是一个用来定义 AGENT-A 的状态的综合指数;  $d_i$  表示需求程度;  $a_i$  表示支付能力;  $s_i$  表示对当前生活状态的满意程度;

是系数, 实际上这个系数的值可以由经验得到. 一般情况下,  $p_i^{(A)}$  的个数是非常少的, 只有很有限的一部分人有着不能被忽略的搬家愿望, 这一点可以通过调整系数来达到. 当人们的状态或 AGENT-A 的状态改变时, 序列  $P^{(A)} = \{p_1^{(A)}, p_2^{(A)}, \dots, p_n^{(A)}, 0 \mid p_i^{(A)} < 1\}$  也会相应地改变.

所以在第  $t$  天迁移人口的总数是一个随机变量, 比如说  $D(t)$ , 而在 AGENT-A 的决策行为中真正起作用的是  $D(t)$  期望. 在第  $t$  天正好到 AGENT-A 来的人形成了一个人口集合  $F = \{a_i \mid 0 < i \leq n\}$ , 如果这个集合的元素个数为  $N(t)$ , 那么它有  $C_n^{N(t)}$  种可能组合, 所有这些组合可表示为  $\{F_1, F_2, \dots, F_k, \dots, F_{C_n^{N(t)}}\}$ ,  $|F_k| = N(t)$ . 相应的  $F_k$  的概率序列可以写成  $P_{F_k}^{(A)} = \{p_{F_k^1}^{(A)}, p_{F_k^2}^{(A)}, \dots, p_{F_k^{N(t)}}^{(A)}\}$ , 从是否定居的角度来看, 它可以分为  $P_{F_k^+}^{(A)}$  和  $P_{F_k^-}^{(A)}$  两个部分,  $|P_{F_k^+}^{(A)}| = D(t)$ ,  $|P_{F_k^-}^{(A)}| = N(t) - D(t)$ . 根据全概率和条件概率规则,  $D(t)$  的概率应为

$$P_{D(t)} = \begin{cases} 0, & D(t) > N(t) > 0 \& N(t) = 0; \\ \frac{e^{-N(t)} N(t)^{N(t)}}{N(t)!} \cdot \frac{C_n^{N(t)}}{C_n^{N(t)}} \frac{1}{C_{|F_k|}^{D(t)}} \frac{1}{C_{|F_k|}^{N(t)-D(t)}} \prod_{j=1}^{D(t)} p_{F_k^j}^{(A)} \prod_{j=1}^{N(t)-D(t)} (1 - p_{F_k^j}^{(A)}), & 0 \leq D(t) \leq N(t). \end{cases} \quad (1)$$

那么  $D(t)$  的期望应为  $E(D(t)) = \sum_{D(t)=0}^C D(t) P_{D(t)}$ ,

其中常数  $C$  是可能迁移到 AGENT-A 的最大人口数. 现在可以知道集合  $P^{(A)} = \{p_1^{(k)}, p_2^{(k)}, \dots, p_n^{(k)}, 0 \mid p_i^{(k)} < 1\}$  中的绝大多数元素的值为零或者接近零, 不过由于城市中人口的众多导致了所有可能的组合数目的巨大性, 要计算  $D(t)$  的期望还是非常困难的. 根据泊松概率曲线的特点, 在区间  $[-3, 3]$  中, 只有尖顶部分不近似为零, 所以可以通过把有效区间限制在一个小范围内来加速对前面所说的公式的计算.

现在可以获取随机变量  $D(t)$  的概率分布了, 之后就可以很容易得计算它的期望  $\sum_{D(t)=0}^C D(t) P_{D(t)}$ . 看起来  $E(D(t))$  乘以天数就可以得到可能迁移的人口总数, 但是这是不合理的, 因为序列  $P^{(A)} = \{p_1^{(k)}, p_2^{(k)}, \dots, p_n^{(k)}\}$  在不断改变, 也就是说现在和以前的迁移事件会毫无疑问地影响其他人迁移到此地的可能性, 不管是积极地影响还是消极地影响. 这个趋势是正效应在 AGENT-A 兴起的时候开始起作用, 同时随着 AGENT-A 越来越成熟, 正效应一点一点地消退直到负效应出现. 这种趋势是对整个  $P^{(A)}$  序列的一个描述, 而不只是对其中某个单一元素的描述. 下面这个公式就是被设计成用来表示这种概率变化的.



$$p_{t+1}^{(A)} = p_t^{(A)} \left( 1 + \frac{e^{\frac{r(\cdot) \bmod N}{N}} - e^{-\frac{r(\cdot) \bmod N}{N}}}{e^{\frac{r(\cdot) \bmod N}{N}} + e^{-\frac{r(\cdot) \bmod N}{N}}} \right) \quad (2)$$

式 (2) 中:  $p_t^{(A)}$  是  $P^{(A)}$  的一个元素或是在时间  $t$  的概率, 这个概率的变动可以用一个双曲正切函数来调整;  $r(\cdot)$  是一个随机数产生过程;  $N$  是一个常数, 用来控制一次有多少概率被改变的比例.  $T_0$  是一个表示正效应能持续多少时间的参数, 这个时间过后, 负

效应就开始起作用了.  $T_0$  的值的选取原则是它不会超过 AGENT-A 的整个发展跨度的 20%.

因此, 随着事件的流逝, 许多人要搬到这里的可能性也在不断地变多或变少, 最后就会形成这样的一个概率分布序列,  $p_1^{(A)}, p_2^{(k)}, \dots, p_t^{(k)}, p_{t+1}^{(k)}, \dots, p_m^{(k)}$ , ... 它们中的任何一个都有一个概率, 表示当天最有可能搬过来的人口数量. 这可以用表 2 来表示.

表 2 迁入人口数量的数学期望

Table 2 The mathematical expectation of popuclon moving in

$P_1^{(A)}$	$P_2^{(A)}$	...	$P_t^{(A)}$	$P_{t+1}^{(A)}$	...	$P_m^{(A)}$	...
$E(D(1))$	$E(D(2))$	...	$E(D(t))$	$E(D(t+1))$	...	$E(D(m))$	...

因此迁移人口的总数是  $C = \sum_{t=1}^{T_D} E(D(t))$ , 其中  $T_D$  表示天数.

3.4 Multi-agent 系统在由 GIS 表示的环境中的运行

另一个重要问题是当把众多的 agent 放入一个 GIS 平台中相互作用时, 如何调度和管理它们. 在现实世界中, 所有这些 agent 所代表的对象的运行完全是并行的; 但是它们的抽象模型在算法中是一些数据结构, 只能被动地等待被激发. 所以需要一些控制模块来调度它们. 所有的 agent 都被安排在一个对象数组中, 并用它们的 D 进行排序. 它们之间存在着广泛的合作, 因为各个地块 agent 虽然模式相同, 但各自发挥的功效益随着属性的差异而不同. 比如有的地块 agent 更多地表现为工业属性, 而另外的地块 agent 更多地表现为农业属性. 一个地块 agent 需要其他地块 agent 的许多协助来完成自己的使命, 比如自己的若干常住人口在其他 agent 内就业, 自己的就业人口需要在其他 agent 内居住, 需要使用其他 agent 内的交通、服务设施等. 所以合作是 agent 行为中的一个重要方面, 它包括既消费由其他 agent 提供的服务, 又提供服务给其他的 agent. 在当前项目中有意义的是服务的类型和数量, 而不是它的实现. 考虑到这一点, 可以通过消息传递机制来实现合作, 并使用消息机制来实现提交请求和回答复. 消息格式包括 4 个部分, 图 9 给出了它们的意义和长度. 第一个 R/A 部分表明这是一个请求消息还是回复消息. 第二和第三个部分分别表明了这条消息来自哪个 agent 以及要给哪个 agent.

定义了消息格式以后, 基于消息传递机制的 Multi-agent 系统的运行如图 10 所示. 不同 agent 之间的相互作用是这样来实现的, 把请求消息放入一个消息队列中然后等待消息回应, 同时另一方面获

取请求消息并把相应的回应消息放入队列.

R/A	源 agent D	目标 agent D	消息内容
1 字节	4 字节	4 字节	16 字节

图 9 消息格式

Fig 9 Message format

作者的模拟系统是一个开放系统, Multi-agent 系统的规模保证了许多新的 agent, agent 的新属性和新行为以及新的空间材料能被加入到系统模型中, 从而使模拟系统从一个简单的模型慢慢变成一个精心的模型. 演化的可能性是 Multi-agent 系统的一个关键的优点, 它对模拟一个不断发展的社会是非常有用的.

3.5 地块 agent 角色演化

在前文中已经叙述了地块 agent 根据所占有资源的类型和数量的不同, 而扮演不同的角色. 如一个主要以耕地、牧场为主要土地利用方式的 agent 将扮演农业角色, 这意味着它在提供就业岗位和优美自然景致方面将有所贡献, 但现代化的农业能提供的就业岗位数量是比较少的. 可见不同的 agent 将扮演多种角色, 由于 agent 间广泛存在的协作关系, 这些角色的重要程度决定了该 agent 存在的价值. 所以, 一个 agent 存在的合理性由它能够对整个系统的良性发展提供的价值所体现.

在 agent 协作的形式中很重要的一种是角色互补, 例如两个相邻的地块 agent, 如果一个承担有公园的职责, 另外一个承担有居住区的职责, 那么它们的毗邻将大大增加各自的价值. 当然, 除了协作之外 agent 间也存在竞争, 例如两个地块 agent 都希望强化自己在住房资源方面的占有率, 但若都成为以居住区提供者为主要角色的 agent 将使得住房数量供大于求, 反而削弱各自在整个系统中的地位.

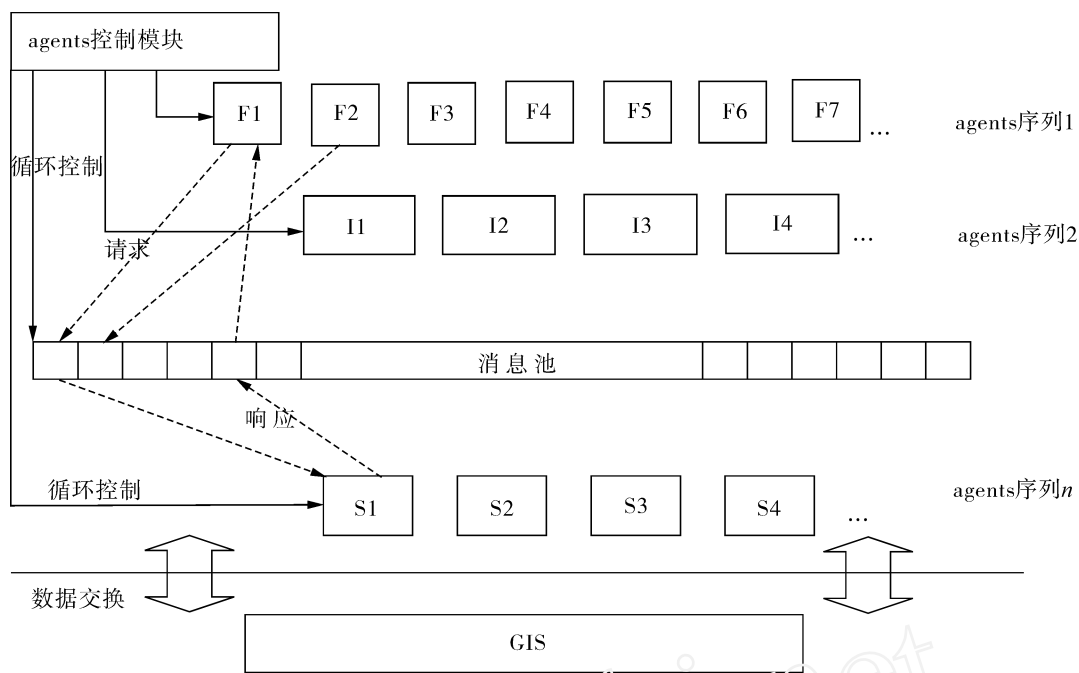


图 10 agent调度与消息传递机制

Fig 10 The schedule of agents and message transmission mechanism

由于城市是不断发展的,对应于地块 agent就是它们的价值体现会发生变化,这是 agent协作与竞争并存的必然结果.所以,各地块 agent的角色是进化的,或说地块 agent在占有的空间位置和土地功能方面存在分裂、合并、消亡的可能.分裂的原则是在一个 agent内的土地占用性质或功能被集中化或单纯化,且存在明显的功能分界,那么可以沿着功能分界线分裂成两个或几个面积稍小的地块 agent 合并的原则是如果毗邻的两个或几个地块 agent具有相同或相似的功能定位,那么它们可以合并成为面积更大的一个地块 agent 消亡的原则是如果该地块 agent为整个系统服务的价值很低,即其他 agent几乎不需要该 agent的协助,那么该 agent作为功能独立的个体可以取消,其所占有的土地由其他 agent接管.根据地块 agent属性定义中的若干标示自身功能定位的项和若干关于服务提供能力的项,上述地块 agent的分裂、合并与消亡操作可以方便地实现.

4 实验和结果分析

到 2000年底,上海常住居民的人口已经达到了 1 321. 63万,平均人口密度为 2 084人 /km<sup>2</sup>,而在市区这个数字是 2 897. 旧城区改造、外来就业人口数量大、制造业快速发展也是促使人口分布发生巨大变化的原因.现在以浦东为例,图 11是两张分别拍摄于 1990年和 2000年的照片,通过它们的对比,可以看到城市发展的显著变化.由黑框围绕起来的两片区域是同一个地方,在黑框角落里的两个尖顶可

以看作是空间参照物.

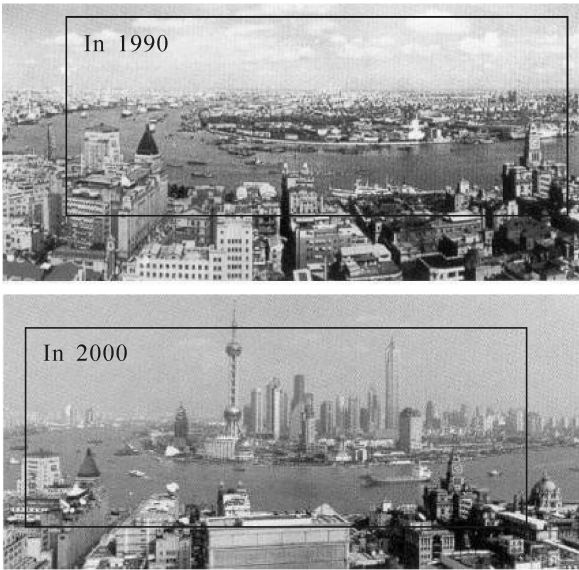


图 11 浦东地区 1990年和 2000年的对比

Fig 11 A contrast of Pudong District in 1990 and 2000 respectively

作者开发了一个基于 GIS平台、Multi-agent系统、agent演化和随机过程分析的模拟系统,来研究在不同领域的不同因素的影响下,城市区域是如何扩展的.因为人口分布是判断城市区域扩展的最重要的依据之一,所以选取了同人口相关的数据作为实验数据展示.

4.1 地块 agent中角色的变化的模拟

图 12是上海浦东地区主要区域.在其中标有主

要的骨干道路网络、地铁、轻轨、磁悬浮线路。黑色网格和格子中间的编号是模拟系统初始时刻的地块 agent 管辖范围和它们的编号。为了使图清晰, agent 掌握的资源并没有全部标出来。模拟实验以浦东地区 1990 年的数据为初始数据, 然后开始持续时间为 15 年的实验。第一个实验是关于 agent 的功能随时间发展的情况。选择 agent<sub>t7</sub> 作为观察对象, 在 1990 年时, 该区域的人口密度为 24 552 人 / km<sup>2</sup>, 比上海市中心区的人口密度要低; 但比浦东其他地方要高, 是一个有居住、工业、农业、商业等功能的地区。经过

近 8 年的发展, 它成为陆家嘴金融贸易区的一部分, 功能完全发生了变化。图 13 显示了在 agent<sub>t7</sub> 内的 25 个小分区从 1990 到 2003 年功能发生的变化, 其中: 区间 [0, 1] 表示交通功能, [1, 2] 表示居住功能, [2, 3] 表示办公区功能, [3, 4] 表示商业功能, [4, 5] 表示生态功能, [5, 6] 表示工业功能, [6, 7] 表示农业功能。开始时 agent<sub>t7</sub> 具有发挥的作用比较多, 但每一项都不突出, 经过实验模拟, 13 年后它的作用集中在 4 个方面, 即交通、写字楼区、商贸和生态上。

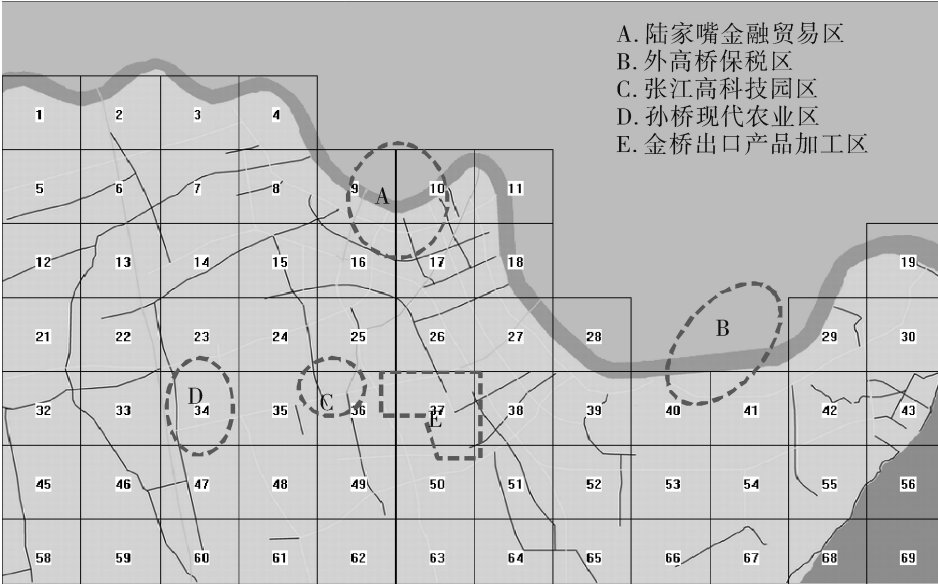


图 12 浦东地区概要模拟分划

Fig 12 Divisions of agents and five typical zones in Pudong District

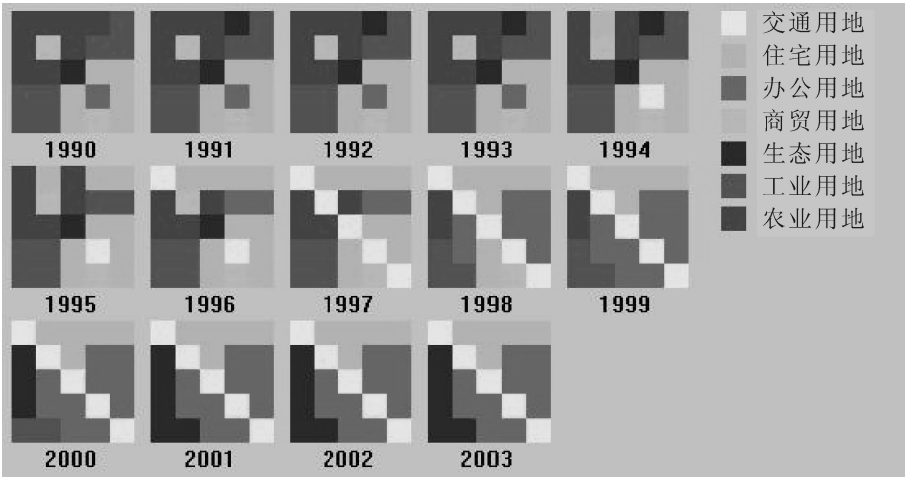


图 13 agent<sub>t7</sub> 角色的进化

Fig 13 The evolution of roles in agent<sub>t7</sub>

4.2 浦东 5 个典型的功能性区域发展的模拟

该实验选择部分地区 (agent<sub>t0</sub>、agent<sub>t1</sub>、agent<sub>t7</sub> 与 agent<sub>t8</sub>, agent<sub>t2</sub>、agent<sub>t3</sub> 与 agent<sub>t5</sub>, agent<sub>t9</sub>、agent<sub>t7</sub> 与 agent<sub>t0</sub>, agent<sub>t0</sub>、agent<sub>t1</sub> 与 agent<sub>t4</sub>, 它们组成 5 个集团) 的实验结果作展示和分析, 因为这 5 个集团在 10 年

后分别发展成为陆家嘴金融贸易区、外高桥保税区、张江高科技园区、孙桥都市农业区和金桥出口加工区, 它们是浦东的典型功能划分。图 14 展示了实验结果, 实验选择居住职能、商贸职能、办公区职能、工业职能、农业职能、交通职能和生态职能作为观察五



实的过程. 实验结果虽然没有与实际数据完全一致, 但所反映的趋势是近似的, 尤其是考虑到对比的数据是每年的增长率而不是年度人口的净增长值.

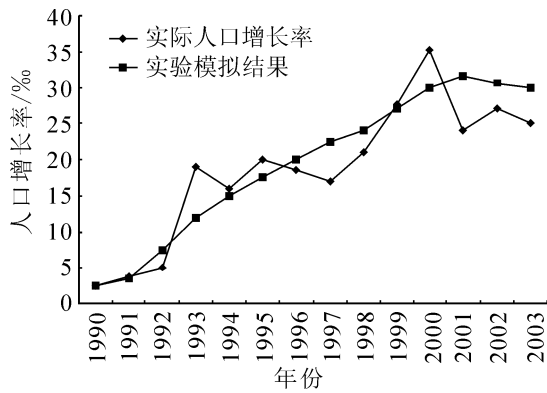
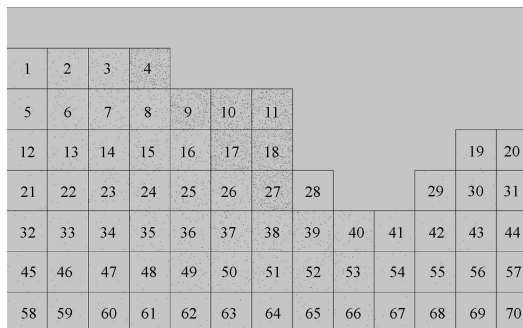


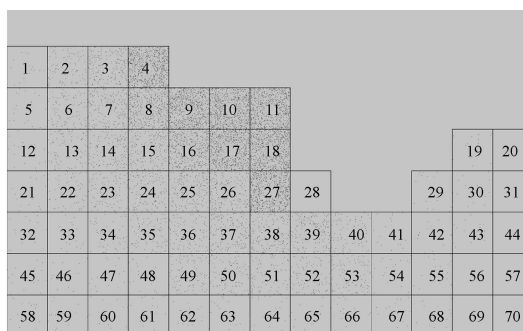
图 16 人口增长率实验结果与真实数据的比较

Fig 16 A comparison of growth ratio of population between actual data and experiment result

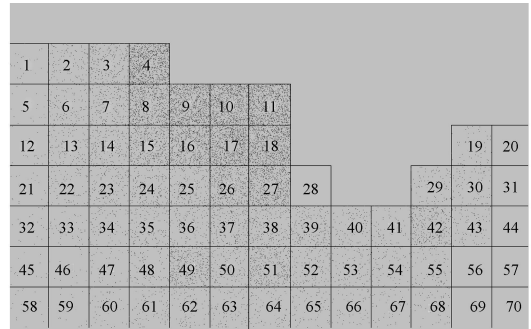
图 17 是模拟浦东地区从 1990 年开始的城市化面积增长的情况, 它显示了 4 个阶段 (1990 年、1996 年、2003 年和 2005 年) 的城市化区域. 纹理的密集程度表示相对的城市化程度, 它与 Agent 的农业功能成反比, 与相对人口密度、居住功能、办公区功能、商业功能、生态功能、工业功能中 3 个最大值的和成正比. 实验结果中城市区域化的面积在 1990 和 2003 年分别是  $48.30\text{ km}^2$  和  $107.35\text{ km}^2$ , 预计到 2005 年是  $138.02\text{ km}^2$ . 而城市化面积的实际值在 1990 和 2003 年分别是  $40.30\text{ km}^2$  和  $110.35\text{ km}^2$ , 预计到 2005 年是  $130.00\text{ km}^2$ .



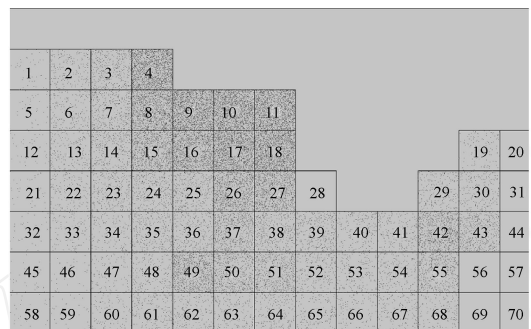
(a) 1990 年城市化程度的模拟结果



(b) 1996 年城市化程度的模拟结果



(c) 2003 年城市化程度的模拟结果



(d) 2005 年城市化程度的模拟结果

图 17 1990、1996、2003 和 2005 年浦东城市化区域的实验结果

Fig 17 The experimental results of urbanized area of Pudong in 1990, 1996, 2003 and 2005 respectively

通过前面所述的实验, 可以观察到哪些地方以及在多大程度上城市被扩展了. 这个系统的关键在于环境和行为的模拟. 基于前述的模拟系统, 其他一些专门的应用也可以从那个基本模型中得到, 只要嵌入某些特殊设计好的模型即可.

## 5 结束语

这个项目的应用背景是基于 GIS 工具研究城市发展问题, 比如在新兴地区的人口增长问题. 为了获得一个基于 GIS 的模拟系统, 设计了一个 Multi-agent 系统来模拟多个个体或各种因素之间的相互作用, 另外通过 GIS 工具建立并维护了一个虚拟环境. 所有的 agent 都被设计成用来表示统计特征, 执行宏观层面上的活动, 而在 agent 的行为中引入了随机过程. 所有的 agent 都是既合作又竞争的, 它们的角色可以渐渐的演化. 这种方法一方面可以减少模拟的复杂性, 另一发面可以提高多 agent 模型的可信度. 从环境的角度来看, 任何可以影响人口迁移的因素都被看作是一种资源, 所以可以用效能函数来定义资源作用在人口迁移上有多大作用的能力. 效能函数的定义在效能综合和简化编程上可以带来一些好处. 模拟试验的结果和实际人口增长及城市化

的过程大体上相吻合. 本仿真模型对 agent 的属性和行为的设计是建立在具有统计意义的、大规模的和宏观层次的基础上,这样做不仅可以在进行计算机模拟时大大减轻庞大的计算和存储负担,更重要的是以这样的粒度将 agent 与对象映射可以精确地反映现实世界的物理过程. 这些结果证明基于增强 GIS 模型的 Multi-agent 系统,随机过程和虚拟环境的建立可以有效地模拟城市化过程.

## 参考文献:

- [1] FORRESTER J W. Urban dynamics [M]. Cambridge, USA: MIT Press, 1969.
- [2] WEGENER M, SPIEKERMANN K. The potential of micro-simulation for urban modeling [C] // Proceedings of the International Workshop on Application of Computers in Urban Planning. Kobe University, Kobe, Japan, 1997: 129-143.
- [3] SKLAR F H, COSTANZA R. The development of dynamic spatial models for landscape ecology: A review and prognosis [M] // TUNER M. G, GARDNER R H. Quantitative methods in landscape ecology. New York: Springer-Verlag, 1991: 239-288.
- [4] GLBERT N, TROITZSCH K G. Simulation for the social scientist [M]. London, UK: Open University Press, 1999.
- [5] KAMOWITZ D, ANGELSEN A. Economic models of tropical deforestation: A review [M]. Jakarta, Indonesia: Center for International Forestry Research, 1998.
- [6] HOWITT R E. Positive mathematical programming [J]. American Journal of Agricultural Economics, 1995, 77 (2): 329-342.
- [7] WENBERGM, KLING C L, WELLEN J E. Water markets and water quality [J]. American Journal of Agricultural Economics, 1993, 75 (2): 278-291.
- [8] CROMLEY R G, HANKS D M. Coupling land-use allocation models with raster GIS [J]. Journal of Geographic Systems, 1999, 1 (3): 137-153.
- [9] LONGLEY P, HIGGS G, MARTIN D. The predictive use of GIS to model property valuations [J]. International Journal of Geographical Information Systems, 1994, 8 (2): 217-235.
- [10] BAKER W L. A review of models in landscape change [J]. Landscape Ecology, 1989, 2 (2): 111-133.
- [11] MERTENS B, LAMBN E F. Spatial modeling of deforestation in Southern Cameroon [J]. Applied Geography, 1997, 17 (2): 143-162.
- [12] GEOGHEGAN J, PRITCHARD L J, OGNEVA-HMMERBLBERGER Y, et al. "Socializing the pixel" and "pixelizing the social" in land-use/cover change [M] // Liverman D, Moran E F, Rindfuss R R, et al. People and pixels. Washington, DC, USA: National Research Council, 1998: 51-69.
- [13] LUDEKE A K, MAGGD R C, RED L M. An analysis of anthropogenic deforestation using logistic regression and GIS [J]. Journal of Environmental Management, 1990, 31: 247-259.
- [14] LEGGETT C G, BOCKSTAEL N E. Evidence of the effects of water quality on residential land prices [J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2000, 39: 121-144.
- [15] BALL N G R J, TABER J T, BROWN M, et al. Multiobjective urban planning using a genetic algorithm [J]. ASCE Journal of Urban Planning and Development, 1999, 125 (2): 86-99.
- [16] MANN S, BENWELL G. The integration of ecological, neural, and spatial modeling for monitoring and prediction for semi-arid landscapes [J]. Computers and Geosciences, 1996, 22 (9): 1003-1012.
- [17] BATTY M, LANGLER P A. The morphology of urban land use [J]. Environment and Planning B, 1986, 15: 461-488.
- [18] BATTY M. Urban modeling in computer-graphic and geographic information system environment [J]. Environment and Planning B, 1992, 19: 663-688.
- [19] BATTY M, XIE Y. From cells to cities [J]. Environment and Planning B, 1994, 21: 31-48.
- [20] TOBLER W R. A computer movie simulating urban growth in the detroit region [J]. Economic-Geography, 1970, 46: 234-240.
- [21] COUCLERIS H. Cellular worlds: A framework for modeling micro-macro dynamics [J]. Environment and Planning A, 1985, 17: 585-596.
- [22] COUCLERIS H. Of mice and men: What rodent population can teach us about complex spatial dynamics [J]. Environment and Planning A, 1988, 20: 99-109.
- [23] COUCLERIS H. Macrostructure and microbehavior in a metropolitan area [J]. Environment and Planning B, 1989, 16: 141-154.
- [24] PHIPPS M, LANGLOIS A. Spatial dynamics, cellular automata, and parallel processing computers [J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 1997, 24: 193-204.
- [25] BENATIS A. A cellular automaton for the simulation of competitive location [J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 1997, 24: 205-218.
- [26] WHITE R, ENGELN G. Cellular automata and fractal urban form: A cellular modeling approach to the evolution of urban land-use patterns [J]. Environment and Planning A, 1993, 25: 1175-1199.
- [27] WHITE R, ENGELN G. Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional modeling [J]. Environment

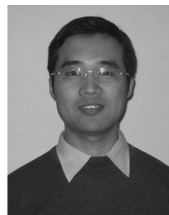
- and Planning B: Planning and Design, 1997, 24: 235-246
- [28] BATTY M, JIANG B in Multi-agent simulation: New approaches to exploring space-time dynamics within GIS [C]// Annual Meeting of GISRUUK '99 (Geographical Information Systems Research-UK). University of Southampton, Southampton, UK, 1999: 14-16
- [29] JIANG B in Agent-based approach to modeling environmental and urban system within GIS [C]// Proceedings of 9th International Symposium on Spatial Data Handling Beijing, 2000: 10-12
- [30] BENENSON I Multi-agent simulations of residential dynamics in the city [J]. Computers, Environment and Urban Systems, 1998, 22(1): 25-42
- [31] BENENSON I, OMER I, PORTUGAL IJ. An agent-based model of residential mobility in the Tel-Aviv metropolitan area [C]// The International Conference on GeoComputation Fredericksburg, VA, USA, 1999: 92-99
- [32] PENG Chong, CHENG Jianquan Using multi-agent system for residential expansion models—A case study of hongshan district, Wuhan City [J]. Chinese Geographical Science, 2007, 17(3): 210-215
- [33] 彭 翀, 杜宁睿, 刘 云. 大城市居住用地扩展的多主体模型研究 [J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2007, 32(6): 548-551.
- PENG Chong, DU Ningrui, LU Yun, Understanding residential expansion in big cities using MAS/RE [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007, 32(6): 548-551.
- [34] 陈 林, 程登发, 陆庆光, 等. 一种基于多 Agent 和 GIS 的麦蚜种群动态模拟方法研究初报 [J]. 植物保护, 2006, 32(6): 33-38
- CHEN Lin, CHENG Dengfa, LU Qingguang, et al Development of large-scale spatio-temporal dynamic model of wheat aphid population based on the multi-agent system and geographic information system [J]. Plant Protection, 2006, 32(6): 33-38
- [35] 侯玉文, 王海宾, 夏 鹏, 等. 基于 MAS/GIS 技术的车辆指挥中心及其实现 [J]. 科学技术与工程, 2006, 6(2): 151-153.
- HOU Yuwen, WANG Haibin, XIA Peng, et al Design and implementation of traffic 's chain of command based on MAS/GIS [J]. Science Technology and Engineering, 2006, 6(2): 151-153.
- [36] 陈 曦. 一种 GIS 环境下基于 MAS 的动态路径规划方法 [J]. 长沙交通学院学报, 2002, 18(1): 22-25.
- CHEN Xi, Dynamic route planning method based on MAS in GIS environment [J]. Journal of Changsha Communications University, 2002, 18(1): 22-25.
- [37] 范鹏飞, 赵 勇. 基于 Multi-agent 的城市交通事故救援系统 [J]. 铁路计算机应用, 2004, 13(6): 1-3
- FAN Pengfei, ZHAO Yong Urban traffic accident rescue system based on multi-agent technique [J]. Railway Computer Application, 2004, 13(6): 1-3
- [38] ZHANG Renjun, WANG Qi, ZHOU Qigang Micro-simulation of tourists ' behaviors in nature heritage resort: A case study on mount emei scenic area [C]// The Second Workshop on Digital Media and Its Application in Museum & Heritage Chongqing, China, 2007: 118-122
- [39] URBAN ID, DELHOM M. Water management using a new hybrid multi-agents system-geographic information system decision support system framework [C]// First International Symposium on Environment Identities and Mediterranean Area (ISEMA '06). Corte-Ajaccio, France, 2006: 314-319.
- [40] JIA R, WAN B, HU Q, et al A multi-agent system using in spatial information sharing on Web-based GIS [C]// Proceedings of 2005 IEEE International Conference on Natural Language Processing and Knowledge Engineering Wuhan, China, 2005: 466-471.
- [41] LI Guangru, SUN Zhi, HU Jingfeng The analysis and design of architecture model and cooperative algorithms among MAS of waterborne GIS [C]// The Sixth World Congress on Intelligent Control and Automation (WCCA 2006). Dalian, China, 2006: 8692-8696
- [42] YANG Jueqiong, MONTAKHAB M, DAVIES T S, et al Fault diagnosis of power distribution systems using a multi-agent approach [C]// The 39th International Universities Power Engineering Conference (UPEC 2004). Bristol, UK, 2004: 448-452

#### 作者简介:



危 辉,男,1971年生,教授,博士,中国人工智能学会人工智能基础专业委员会委员、中国系统仿真学会生命系统建模仿真专业委员会委员、上海市计算机学会计算机理论与人工智能专委会委员、上海市自动化学会理事、复旦大学波散射和遥感中心教育部重点实验室图像处理与GIS

研究室主任. 主要研究方向为人工智能研究. 主持多项国家自然科学基金、973子课题、国防 973 专题课题、航天支撑计划课题、中国科学院智能信息处理重点实验室开放基金课题, 参加多项 973 前期专项课题、国家自然科学基金委员会重大研究计划面上项目等. 发表学术论文 40 余篇.



白 宇,男,1980年生,硕士研究生,主要研究方向为人工智能研究.