

文章编号: 1007 4619 (2006) 06 0829 07

# SARS 传播动力学模型及其多智能体模拟研究

龚建华<sup>1</sup>, 周洁萍<sup>1</sup>, 徐 珊<sup>1,2</sup>, 王卫红<sup>2</sup>

(1. 中国科学院 遥感应用研究所 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101;

2. 浙江工业大学 软件开发环境重点实验室, 浙江 杭州 310014)

**摘 要:** 本文建立了 SARS 时空动力学传播模型, 并应用多智能体技术研究个体尺度上 SARS 时空传播行为的模拟方法。基于虚拟地理环境系统平台, 本文采用 Java 和 VRML 开发工具, 研发了 SARS 传播与控制的智能体模拟原型系统, 并以 SARS 在虚拟社区的传播为例, 开展了 SARS 时空传播行为模拟的初步试验以及反映 SARS 疫情控制效果的参数敏感性分析。

**关键词:** 虚拟地理环境; SARS; 多智能体; 时空传播模型

中图分类号: P208 文献标识码: A

## Dynamics Model and Multi Agent Based Simulation of SARS Transmission

GONG Jian hua<sup>1</sup>, ZHOU Jie ping<sup>1</sup>, XU Shan<sup>1,2</sup>, WANG Wei hong<sup>2</sup>

(1. State Key Lab of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing Application, CAS, Beijing 100101, China;

2. Key Lab of Software Development Environment, Zhejiang Industrial University, Zhejiang Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** SARS spatio temporal transmission and control model is established, and multi agent technology is employed to model the SARS spatio temporal spreading behavior. Based on the virtual geographic environment platform and application of Java and VRML tools, this paper designs and develops a prototype system to carry out agent based simulation of SARS transmission and control in a virtual community. The rudimentary experimental results demonstrate that the model and simulation implemented in the paper can be used to represent the characteristics and laws of SARS transmission.

**Key words:** Virtual geographic environment; SARS; multi agent; spatio temporal model

## 1 引 言

SARS (Severe Acute Respiratory Syndrome) 也称为传染性非典型性肺炎, 是一种新型的、具有很强传染性的严重急性呼吸道综合征。2003 年年初, SARS 在中国大陆、香港、台湾等地区陆续暴发和蔓延, 严重威胁了人民的生命安全, 并对社会稳定、经济发展造成了很大的影响。虽然 SARS 疫情已经过

去, 但是对于 SARS 的发生、传播与控制的特征与规律, 仍然需要进一步的深入研究, 同时也为未来类似 SARS 的新发传染病预警、预防与对策建立理论与方法基础。

关于 SARS 传播与扩散的时空特征规律和疫情控制措施效果等问题, 已有许多探讨。例如, Donnelly 等应用统计分析方法<sup>[1]</sup>, 研究香港影响 SARS 传播的因子特征以及公共健康防疫措施的作用。在 2003 年 5 月 23 日发表在 Science Express 上

收稿日期: 2005 05 18; 修订日期: 2005 12 30

基金项目: 国家自然科学基金项目 (编号: 40471103), 中国科学院遥感应用研究所知识创新工程项目 (编号: CX020021)。

作者简介: 龚建华 (1965—), 男, 研究员, 1995 年于北京大学遥感与 GIS 研究所获博士学位。主要研究方向: 健康 GIS、虚拟地理环境与区域可持续发展, 发表 60 余篇学术论文。E-mail: jhgong@irsa.ac.cn, 虚拟地理环境网址: www.vgelab.org

的 SARS 研究专题中<sup>[2-4]</sup>，Lipsitch 等与 Riley 等分别依据新加坡与香港的 SARS 疫情统计数据，建立了动态数学模型。龚建华等应用系统动力学模型<sup>[5]</sup>，定量地分析“早发现、早隔离、早治疗”措施，对于控制 SARS 疾病扩散与传播的重要性。但是目前 SARS 传播时空模型的研究，均是在一个比较宏观尺度上对整个 SARS 数据进行的统计分析或者统计模拟实验，并不考虑在具体三维地理社会空间中（涉及三维地理空间结构与功能布局以及个体、社会活动行为）SARS 传播过程的特征与机理的研究。

智能体 (Agent) 技术是一种全新的分布式计算技术，具有主动性、交互性、反应性、自主性等特点<sup>[6-8]</sup>。智能体模拟具有优于传统数值模拟技术的地方，首先智能体模拟提供了形象的可视显示，使用户 (模拟设计者) 能够在模拟过程中直观地评估智能体的行为；其次，用户能够动态地跟踪如何由智能体个体相互作用的结果形成全局结果。本文则结合虚拟地理环境 (Virtual Geographic Environments VGE)<sup>[9]</sup> 与智能体技术，以虚拟地理环境对现实生活环境的模拟，以及多智能体对人类行为活动的仿真，从 SARS 本身的传播机制入手，研究 SARS 时空

传播规律及对 SARS 疫情控制措施效果的评价。

## 2 SARS 时空传播模型

### 2.1 动力学概念模型

流行病 SARS 的传播是一个动力学过程<sup>[5]</sup>，如图 1 所示。在图 1 中，SARS 感染者，包括外地输入者、医院里被感染的医务人员以及通过家属、就医与社会交往的 SARS 感染者；SARS 发病者，是由 SARS 感染者转化而来，或者由外地直接输入；SARS 发病者，如果停留在社会上，则可能会感染他人；一般地，经过一段时间，会到医院就诊、治疗。与 SARS 发病者接触的人，将被送往隔离区隔离。在医院，SARS 发病者，可能会感染医护人员以及其他就医者。最后，SARS 发病者，经过治疗，健康出院；或者，由于种种原因，不治死亡。为了控制 SARS 疫情，可以通过加强个人防护与减少社会活动，采取早发现、早治疗、早隔离措施，减少 SARS 发病者在社会上继续感染他人的机会；在医院里，则通过加强医护人员的防护措施，减少医护人员及医院里的其他就医者的感染机会；同时依靠科学，加强措施，降低病死率。

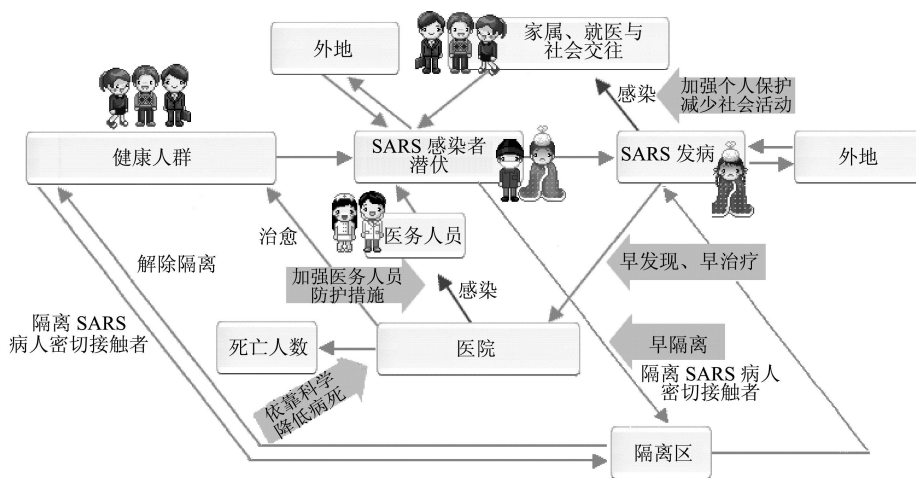


图 1 SARS 传播动力学概念模型

Fig 1 Conceptual model of SARS transmission dynamics

### 2.2 引入地理空间差异的 SARS 传播模型

从图 1 中可以看出，被 SARS 发病者感染的健康 (易感) 人基本上有两种，一种是在“家属、就医与社会交往”被感染的自由区健康人群；一种是在治疗 SARS 发病者时被感染的“医务人员”隔离区因其具有良好的隔离措施和防疫措施，假设其中隔离的潜伏期患者发病时并不感染其他人)。考虑这两种人群受

SARS 病毒感染机制的差异性，并因其发生环境的不同，引入考虑地理空间的 SARS 传播模型，将健康人的感染机制分为处于自由区域 (家庭、就医与社会交往) 的健康人被感染，和在医院里的“医务人员”被 SARS 病人感染这两类，如图 2 所示。本文主要侧重于在自由区域中 SARS 感染机制的研究。

由图 2 建立的具有空间区域特征的 SARS 传播模型可知，针对自由区、隔离区和医院的 SARS 传

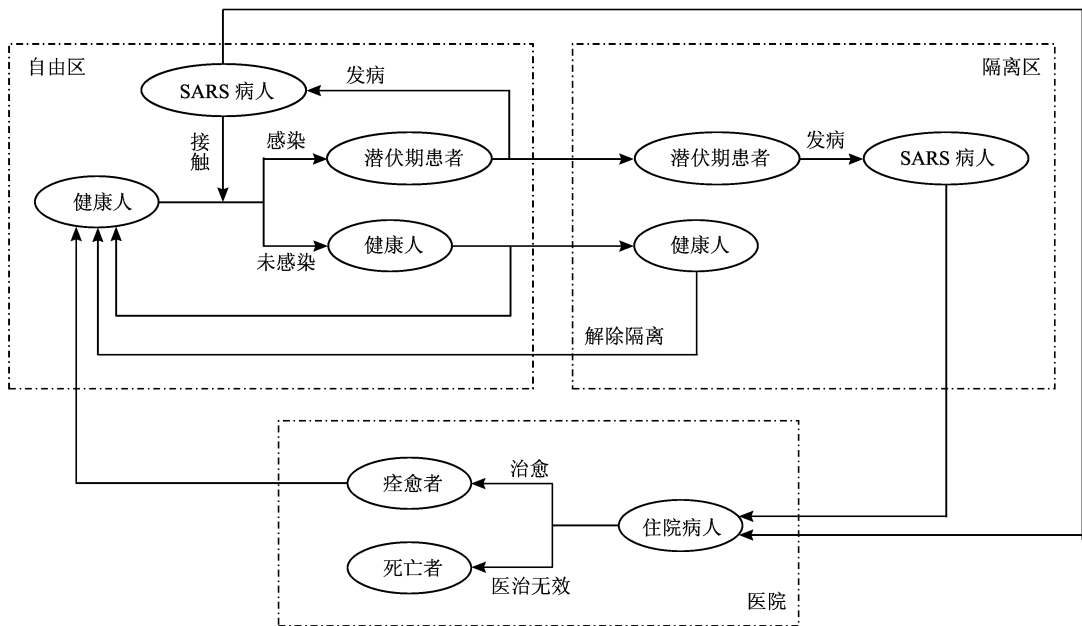


图 2 具有地理空间特征的 SARS传播模型

Fig 2 SARS transmission model based on geographic areas

播,需要对人群进行分类,该模型将人群分为健康(易感)人、潜伏期患者、SARS病人、住院病人、痊愈者和死亡者。

### 2.3 虚拟地理环境中 SARS时空传播物理模型

SARS传播的主要途径是健康人与 SARS病人接触,接触后是否感染取决于健康(易感)人的易感状况、SARS病人的传染力、两者接触的密切程度及当时的周围环境现状等。“接触”是“感染”的前提条件,是发生 SARS传染这个物理过程的必要条件,因此,引入虚拟地理环境的二维环境,对 SARS传染以及扩散的物理过程进行描述,建立虚拟地理环境中 SARS时空传播物理模型,如图 3所示。

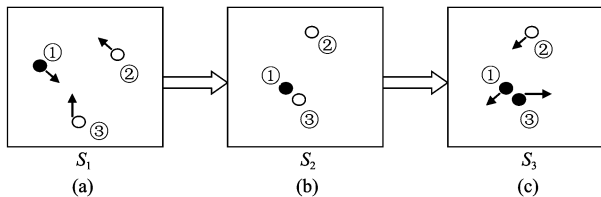


图 3 虚拟地理环境中 SARS时空传播物理模型

Fig 3 Physical model of SARS spatiotemporal transmission in VGE

图 3是虚拟地理环境中 SARS时空传播物理模型的二维表达,其中白色圆点代表健康人,黑色圆点代表 SARS病人,灰色圆点代表被 SARS病人感染处

于潜伏期患者。

图 3 (a)表示在虚拟地理环境中,每个圆点按照自己的出行路线以及行走规则移动。根据智能体类型、周边环境等因素设计智能体详细出行模型,智能体根据自身的行为模型确定自己的行为路线和行走规则,例如在医院的 SARS传播模拟中,智能体是在医院的楼道、电梯、病房等自由行走,但代表医务人员的智能体其行为更为特殊,它是主动去接触 SARS病人,其行走规则的设计则要反映其行为(如一段时间内,主动行走走到负责的病房)。在本文的原型研究中,智能体的行走虚拟社区中是设定为随机的。具体行走规则的定义如下:使智能体朝某个方向移动,每隔一秒随机选择一个方向,当这个方向与原行走方向在 90°偏差内,智能体改变方向,如果超过这个偏差则重新选择方向。表现在智能体行走行为,则为允许智能体前进,左转或右转行进。智能体的移动速度及路线决定了一个周期内接触其他圆点(智能体)的总数,其中移动速度与社会流动性有关。

图 3 (b)表示当两个圆点(智能体)距离相近小于某个值  $h$ ,则视两者为面对面密切接触。参考 WHO对 SARS流行病学规定的密切接触定义,如健康人与 SARS病人有面对面接触,则有可能被 SARS病毒感染,见图 3中 SARS病人①和健康人③接触。

图 3 (c)表示其中一部分健康人被传染,例如健康人③变为潜伏期患者③,是否被感染由个体感染

率  $p$  决定。个体感染率  $p$  与普通意义上的感染概率不同,一般感染概率指一群易感者暴露在 SARS 高危环境后被 SARS 感染的人数与总暴露人数的比值,是统计意义上的平均值。而在本研究中每个智能体都是独立自主的系统,系统总体感染情况则是以多个智能体的个体规则及其行为的综合效果来形成的,因此,此处的个体感染率  $p$  仅作为单个智能体在接触 SARS 病毒之后是否被感染的概率。系统采用随机数的方法,即产生一组大小在 0 到 1 内随机数,如此随机数在 0 到  $p$  的范围内,则系统判断该个体被 SARS 感染。

以上是虚拟地理环境中 SARS 的时空传播物理模型及以该模型为基础从微观动力学机制模拟 SARS 的整个传播过程。

### 3 SARS传播行为的智能体建模

结合 SARS 时空传播模型,本文对智能体个体内部结构及智能体行为过程进行了设计,如图 4 所示。公共规则库是所有智能体共享的知识库, SARS 模型为其提供了动力学支持及基本规则,同时也对智能体的决策做出了指导<sup>[10]</sup>。智能体通过解析器解析外部消息,放入规则知识库中,规则知识库还包括其他类型的信息如规则等。决策引擎通过检索知识库中的信息对智能体的行为进行指导,每一次行为过后,都将状态变化后的关键信息写入到目录服务器中,用于其他智能体或系统的检索。其中和 SARS 模型关系较为紧密的是规则知识库和决策引擎。

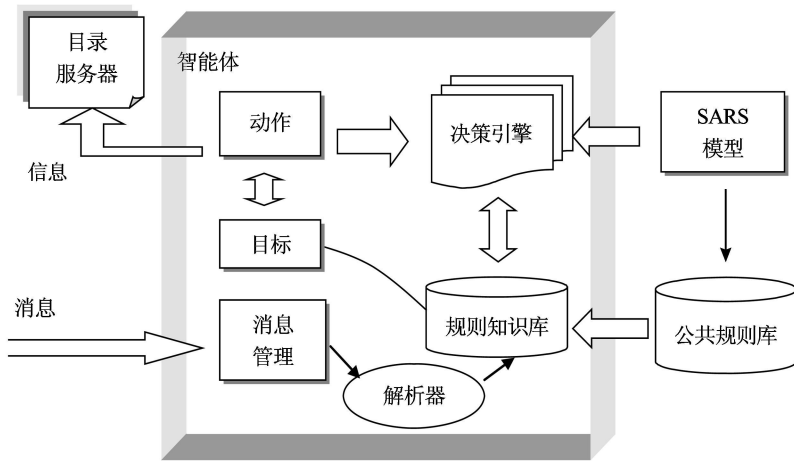


图 4 智能体内部结构图

Fig 4 Inner structure of agent

#### 3.1 智能体属性设计

一个智能体隶属于虚拟地理环境中的一个智能

化身 (Agent) 类,并具有很多属性。基于面向对象方法,本文定义一个智能体的基类是 Agent 类。Agent 类中的主要成员变量及其含义见表 1。

表 1 Agent 成员变量及含义

Table 1 Member variables and meaning of agent

成员变量	含义	成员变量	含义
ID	Agent 的身份标识	latentPeriod	潜伏期长度
pos_x	Agent 在虚拟空间中的位置	exposurePeriod	进入传染期仍未就医的时间
pos_y			
pos_z			
bodyType	健康状况,以此判断 Agent 的类型	infectRate	感染率
isContiguity	是否和感染者有过传染性接触	deathRate	死亡率
isControlled	是否可控	isAFerm	是否在恢复期内
isInfected	是否被传染	recoverPeriod	恢复期长度
isIsolated	是否被隔离	movement	Agent 的位置移动
isDead	是否死亡		

### 3.2 规则知识库

规则是构成知识库的基础,它对智能体的行为有指导作用。公共规则库是系统和 SARS传播模型关联最为紧密的部分,对整个智能体系统的演变进行指导。

根据模型设计,将智能体分为四类: healthy (健康易感者), infected (潜伏期患者), sick (SARS 病人)以及 patient (住院病人),作为它们的第二属性特征 (第一属性为 ID 号)。虚拟地理环境从功能和布局上分为如下三个类型的区域: Free Area (正常活动区域), Isolate Area (隔离区)和 Hospital (医院)。不同类型的智能体有不同的规则。由于智能体的状态在其行为过程中是不断变化的 (表 2),因此一个智能体在不同阶段采用的是不同的规则知识库。

表 2 智能体的状态转换表  
Table 2 Transition of agent state

状态类型	前提条件					下一状态类型
	isInfected	IsControlled	isIsolated	other	isInTerm	
Healthy	No	No				Healthy
		Yes				
Infected	Yes	No				Infected
		Yes				
			Yes		Yes	Infected
			No			
Sick			Yes		No	Patient
			No	②		Sick
Patient					Yes	Patient
				③		Die
					No	Healthy

表 2给出了一些基本规则,规则包含前提条件及相应结果。表中的前提条件分别有:是否被感染、是否可控、是否被隔离和是否在某个期间内 (包括 Infected的潜伏期、Sick的发现期、Patient的恢复期) (表 2中条件②、③参照表 3所示)。

表 3 条件说明  
Table 3 Condition description

前提条件	描述	说明
②	Delayed	潜伏期过后没有立即入院治疗,随着天数 (T)的增加,感染率 (P)上升
③		每个 Patient根据死亡率估算自己是否死亡,有随机性

### 3.3 决策引擎

智能体面向目标的行为过程是由一系列的状态和行为决策组成的,有许多不同的层面,每一层面代表智能体的不同侧面的行为。每个层面都有自己的状态和决策,控制自己的状态转移和行为。其中还

包含了一系列的先决条件,即智能体从一个状态向另一个状态发生转变的先决条件。

决策具体分为整体决策和个体决策。整体决策是对整个智能体系统的宏观决策,包括对模拟参数的调节 (如社会流动性等)和对模拟周期的长短控制等宏观策略调整。个体决策则针对智能体个体而言,如下一步进入什么状态、是否被隔离、是否该入院治疗等等,不同智能体的决策各不相同。

## 4 原型系统与初步试验

### 4.1 原型系统研发

本文采用 Java和 VRML编程工具,结合智能体技术,基于分布式虚拟地理环境系统平台<sup>[9]</sup>,研发了 SARS传播与控制的智能体模拟原型系统,图 5是原型系统的功能结构图。

在功能上,系统可以分为虚拟地理环境系统 (VGE)模块、智能体 (Agent)系统模块和用户界面模块三个部分。虚拟地理环境系统模块为智能体的

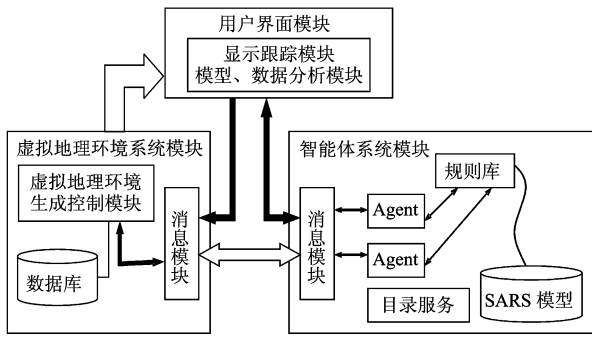


图 5 原型系统功能结构图

Fig 5 Structure of the prototype system

行为提供了三维虚拟空间,并负责三维场景及对象的建造和更新;智能体系统模块则描述了处于虚拟地理环境中的成员个体行为,它们感知周围环境,并通过目标驱动的行为作用于环境;用户界面模块为用户观察者提供了二维/三维的显示方式,并对虚拟地理环境及任何时刻在其中发生的一切行为进行观察与数据分析。

系统具体运行过程如下:

(1)用户进入该系统后,由虚拟地理环境系统模块为用户界面模块提供一个二维/三维环境,用户界面模块对此环境进行显示,同时用户通过与用户界面模块进行交互,向虚拟地理环境系统模块发出相应消息,实现用户在虚拟环境中的漫游、观察等交互工作。

(2)用户在交互界面中输入相应的参数后,点击初始化按钮,用户输入的参数及初始化命令就作为消息传递给智能体模块,智能体据此进行初始化,同时智能体模块将初始化的智能体消息传递给虚拟地理环境系统模块,在虚拟地理环境中产生智能体相应的三维化身形象。

(3)当用户点击交互界面的运行按钮时,相应命令作为消息传递给智能体模块,智能体模块中的智能体按照规则库中的规则和 SARS模型确定智能体的行为及状态转换,并将相应消息传递给虚拟地理环境系统模块。同时,虚拟地理环境系统模块将智能体在空间上临近的其他智能体的信息传递给智能体模块。

#### 4.2 初步试验

本文模拟的是一个封闭虚拟社区内的 SARS传播过程。系统假设初始病例为外来输入病例,且在 SARS传播过程中既无外界人群及病例的输入,也无输出人口。三维虚拟社区是应用 3DStudioMax 虚拟

建模,并在原型系统中用 VRML表达。参考 SARS研究相关文献 [1—3]以及 2003年北京等的 SARS传播情况,模拟试验假设虚拟社区人数为 1000(人),初始病例为 3(人),个体易感度为 0.7,潜伏期为 5(天),社会流动性(该参数在模拟中体现在智能体的移动速度)为 3,发现天数(就医时间)为 7天。图 6为每日的病例总数模拟结果图的最后一天截图,横坐标是模拟的天数,纵坐标为每日的病例总数,模拟了 40天的 SARS传播过程。二维导航图以二维点的形式显示了人群的分布。三维图则是以不同三维化身表达相应人群(健康人、潜伏期患者等)的三维空间分布。在其他初始条件相同的情况下,把发现天数(就医时间)分别设为 7天和 5天,可以看出发现天数(就医时间)越短,病患总数就越少(由 85人降为 70人),且随着曲线越平滑,可见发现天数(就医时间)的长短对于病人的增加有较大的影响。

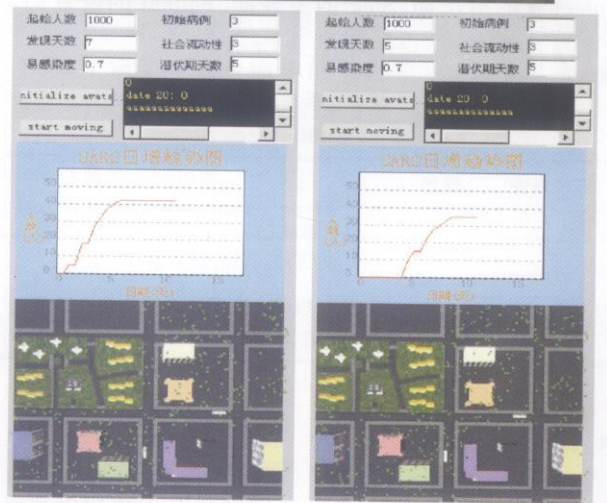


图 6 每日病例人数以及空间分布模拟结果图

Fig 6 Number of SARS cases and spatial distribution of individuals

从日增病例趋势表可以看出,每日病例数的曲线图接近于传播的初期和末期已经处于稳定状态,日新增病例接近于零,病例总数曲线则逐渐变得平缓,直到维持基本不变。曲线图基本符合 Logistic 曲线,系统模拟的结果基本上反映了 SARS 传播和演化过程的主要特征与规律。

## 5 结 论

本文设计了 SARS 时空传播动力学模型及与 SARS 模型关联极为密切的智能体知识库和决策引擎,实现了通过一系列的规则对智能体的行为进行引导的能力。以上述模型为基础,结合虚拟地理环境和智能体技术,开展了三维虚拟社区 SARS 时空传播的初步模拟试验及统计学计算分析,试验结果基本合理。未来进一步的研究工作包括:大规模智能体交互行为的高效能计算与优化;大规模智能体实时动态行为的三维表达与快速绘制;考虑社会关系模型、地理空间环境与人的出行活动模式的 SARS 时空传播与控制机理模型;以医院内真实 SARS 传播案例为基础,研究医院内医务人员感染 SARS 的物理过程模型;研究现代交通对 SARS 传播机制的影响,并提出有效控制措施等等。

## 参 考 文 献 (References)

- [1] Donnelly C A, Chan I A C, Leung G M, et al. Epidemiological Determinants of Spread of Causal Agent of Severe Acute Respiratory Syndrome in Hong Kong. Published Online May 7, 2003, <http://image.thelancet.com/extras/03art4453web.pdf>
- [2] Lipsitch M, Cohen T, Cooper B, et al. Transmission Dynamics and Control of Severe Acute Respiratory Syndrome [J]. *www.sciencexpress.org/23 May 2003/Page 1/10. 1126/science.1086616*, 2003.
- [3] Riley S, Fraser C, Donnelly C A, et al. Transmission Dynamics of the Etiological Agent of SARS in Hong Kong: Impact of Public Health Interventions [J]. *www.sciencexpress.org/23 May 2003/Page 4/10. 1126/science.1086478*.
- [4] Dye C, Gay N. Modeling the SARS Epidemic [J]. *www.sciencexpress.org/23 May 2003/Page 1/10. 1126/science.1086925*.
- [5] Gong J H, Sun Z L, Li X W, et al. Simulation and Analysis of SARS Control [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2003, 7 (4): 260—265. [龚建华,孙战利,李小文等. SARS 疫情控制的模拟分析 [J]. *遥感学报*, 2003, 7 (4): 260—265.]
- [6] Luo Y W. Study on Distributed GIS Based on Agent [D]. Ph. D Dissertation of Peking University, 1999. [罗英伟. 基于 Agent 的分布式地理信息系统研究 [D]. 北京大学博士研究生学位论文, 1999.]
- [7] Gimblett R, Roberts C, Daniel T, et al. An Intelligent Agent Based Model for Simulating and Evaluating River Trip Scenarios Along the Colorado River in Grand Canyon National Park [A]. Gimblett H R. *Integrating GIS and Agent Based Modeling Techniques for Understanding Social and Ecological Processes* [M]. Oxford Press 2000.
- [8] Parker D C, Manson S M, Janssen M A, et al. Multi Agent Systems for the Simulation of Land Use and Land Cover Change: A Review [J]. *Annals of the Association of American Geographers* 2003, 93 (2): 314—337.
- [9] Gong J H, Lin H. Virtual Geographic Environment: A Geographic Perspective on Online Virtual Reality [M]. Beijing Higher Education Press 2001. [龚建华,林琿. 虚拟地理环境——在线虚拟现实的地理学透视 [M]. 北京:高等教育出版社, 2001.]
- [10] Anastassakis G, Ritchings T, Panayiotopoulos T. Multi agent Systems as Intelligent Virtual Environments [A]. Baader F, Brewka G, Eiter T. *Lecture Notes in Computer Science, LNAI 2174* [C], Berlin Heidelberg Springer Verlag 2001.