

多智能体一致性协议可视化仿真平台的研究

谢光强^{1,2} 章云¹ 李杨^{1,2} 田建峰³ 曾安²

(广东工业大学自动化学院 广州 510006)¹ (广东工业大学计算机学院 广州 510006)²

(中国电力科学研究院新能源研究所 北京 100192)³

摘要 设计实现了一种通用的大规模多智能体一致性协议可视化仿真平台,介绍了平台的体系结构、工作流程、详细设计与实现,最后以舆论传播为例给出了仿真平台的测试与结果分析;提出了进行系统总体性能分析所需的性能指标,给出了具体定义,从而实现了多智能体系统性能的分析 and 评价。仿真平台通过设置系统主要参数和加载对应的一致性协议,能快速进行各种一致性模型的仿真验证,再现系统的演化过程,主要的设计方法是先进行系统环境的搭建,包括智能体、网络拓扑、任务目标、一致性协议等基本要素的设计,平台还能将系统演化过程进行图形化显示,并统计整个过程所消耗的资源的信息。

关键词 多智能体系统,一致性,仿真平台

中图分类号 TP301 **文献标识码** A

Research of Visual Simulation Platform for Consensus Protocol of Multiagent System

XIE Guang-qiang^{1,2} ZHANG Yun¹ LI Yang^{1,2} TIAN Jian-feng³ ZENG An²

(Faculty of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)¹

(Faculty of Computer, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)²

(Renewable Energy Department, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)³

Abstract In this study, a general visual simulation platform was designed for large-scale multiagent system. The platform was introduced including the architecture, workflow, detailed design and implement. Finally a simulation and analysis of the platform were showed by the evolution of a krause consensus model. The definition of the system performance according to different properties was designed. The platform can finish the analysis and evaluation of the system performance. The simulation of platform shows the evolution of system rapidly by setting the system parameters and loading different consensus algorithms. The main method including the designs of agent, topology, task, consensus algorithm was introduced. The evolution of system can be showed by graphical display, and the statistical information of the resources consumed can be got.

Keywords Multiagent system, Consensus, Simulation platform

1 引言

多智能体系统是多个智能体组成的集合,它的目标是将大而复杂的系统建设成小的、彼此互相通信和协调的、易于管理的系统,因此多智能体系统成为分布式人工智能研究中的主要研究对象,研究的主要目标就是期望通过大规模的智能体之间的合作协调来代替昂贵的单个系统,从而完成复杂的任务。多智能体系统具有健壮、可靠、高效、可扩展等特性。随着人类社会进步和科学技术的发展,人工智能体在人类生产和生活中占有了越来越重要的地位,在工业、军事、农业、社会学、医学、建筑业等领域中广泛应用^[1-6]。

多智能体系统本质上来说属于复杂系统,而传统的仿真技术难于描述复杂的场景,现在的研究多采用面向多智能体的建模仿真技术进行系统建模,目前国内外也有一些学者进行了多智能体系统仿真平台^[7,8]的研究,取得了一定的进展,但也存在不少问题,具体描述如下。

(1)大多数多智能体系统仿真平台都是专用仿真平台,只能针对某一个具体的应用领域进行仿真实验。较有代表性的为:OPEMCSS^[9]、MADKIT^[10]、JAMES^[11],其中 OPEMCSS 仿真平台适用于复杂交通系统的仿真, MADKIT 仿真平台适用于复杂供应链的仿真实验, JAMES 仿真平台适用于多协商智能体分布式并行演化的仿真实验。这些仿真平台都在各自

到稿日期:2013-04-30 返修日期:2013-06-08 本文受国家自然科学基金项目(U0735003,60974047,61300107),广东省自然科学基金项目(8351009001000002,S2012010010212),广东省教育部科技部产学研结合项目(2012B090600037,2012B091400038)资助。

谢光强(1979—),男,博士生,副教授,主要研究方向为多智能体、智能控制,E-mail:superxgq@163.com;章云(1963—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为模式识别、智能控制与信息处理技术;李杨(1980—),女,博士,讲师,主要研究方向为智能控制和数据挖掘;田建峰(1977—),男,硕士生,工程师,主要研究方向为发电试验检测与控制;曾安(1978—),女,博士,副教授,主要研究方向为智能控制和数据挖掘。

的领域发挥了重要的作用,但这几种仿真平台都无法通用。

(2)有些多智能体系统仿真平台虽然通用性较好,可以同时支持多个领域的仿真实验,但平台的搭建和构造非常繁琐,移植性也比较低。较有代表性的仿真平台有:Ascape^[12],Repast^[13],Netlogo^[14],Swarm^[15,16],TNG-Lab^[17]。Ascape 仿真平台由美国圣菲研究所研制,Repast 仿真平台由美国芝加哥大学研制,Netlogo 由美国西北大学研制,TNG-Lab 仿真平台由美国爱荷华州立大学研制,其中 Netlogo 仿真平台、Repast 仿真平台和 Swarm 仿真平台应用较为广泛,这 3 个平台都是基于 JAVA 语言开发的,所以具有较好的移植性,但 Netlogo 仿真平台有部分功能需要付费才能使用,因此使用人群有限;Repast 仿真平台与 Swarm 仿真平台是一个免费的平台,可用于多个领域,应用范围较广,同时支持多个主流的操作系统,如 UNIX 和 WINDOWS 操作系统。以上平台使用都较为复杂,使用者需要花费大量的时间熟悉和掌握系统,同时这些平台对于较复杂系统的仿真支持还不够,仿真效果不是很理想。

(3)不管是以上哪一种仿真平台,使用者都要进行编程建模,用户必须具有一定的程序设计的基础,还要了解平台内在构造,使得使用者必须花大量的时间来熟悉平台,使用者往往无法通过简单方法进行建模,造成系统使用的门槛较高,难以掌握,使用者往往未能发挥出平台的优势^[18-20]。

(4)随着多智能体系统的迅速发展,对仿真平台的要求也越来越高,现有的仿真平台很难满足这些要求,主要存在两方面问题。首先多智能体系统是通过大规模简单智能体以局部合作协调策略来实现一项复杂任务的目标,因此系统里的智能体数目往往非常庞大,执行任务的环境也会比较复杂,智能体之间进行协调控制的策略也会多样化。同时,由于多智能体系统本质上是一个迭代系统,当系统的协调控制策略确定后,系统演变的结果往往和系统的初始拓扑结构有直接的关系。不少研究也表明系统初始拓扑结构若发生变化,即使保持相同的控制策略,系统演化结果也会有明显的不同。由此可以看出,影响多智能体系统演化的因素有很多,系统的尺寸、智能体自身的能力、系统的协调控制策略、网络结构、任务描述、环境变化都可能对系统演化产生非常大的影响,这也使得实现多智能体系统的仿真会异常困难,仿真平台的结构也会非常复杂和难以掌握。

综上所述,由于多智能体一致性协议种类众多,应用范围很广,在群体运动中,智能体数目也很庞大,因此很有必要设计一种通用的大规模多智能体协同控制平台,高效地再现系统的演化过程,快速进行模型的仿真实验验证。平台能够模拟各种类型的多智能体系统进行协同控制,通过设置系统主要参数和加载对应的一致性协议,模拟和评估各项任务的完成情况,为协议的完善修正提供坚实的基础;对于使用者而言,平台使用简单,无需进行编程,只需要进行参数设置就可以进行相应的实验,从而提高仿真实验的效率。

本文先介绍仿真平台的整体架构设计和工作流程设计,在此基础上给出仿真平台的详细设计,包括数据接口规范和核心模块设计,最后利用搭建的仿真平台进行测试和实例分析。

2 仿真平台体系结构设计

要建立一个基于多智能体系统的仿真平台,首先要研究智能体对象的内在和行为特征,要对智能体对象进行建模,同时还需要搭建系统的整体框架,框架必须具有可靠性、安全性、可维护性、可用性、可扩展性。

架构设计是平台设计中最重要的一部分,IEEE 标准 1471 中对架构是这样定义的:架构是在组件及其彼此间和与环境间的关系引导设计发展原则中体现的系统的基本结构。设计架构的工作主要包含两部分的内容,一部分是相对独立子系统的设计,包含了类、组件、子模块;一部分是子系统之间进行数据联系的接口设计。整个仿真平台的设计也遵循以上原则。

平台框架主要是仿真平台提供通用的解决方案,方案主要实现面向多智能体协调控制一致性协议的仿真实验验证。平台提供系统建模和实验仿真两种功能,系统集成舆情传播、移动聚集、群集运动等应用领域的多智能体系统模型,并提供了基于离散化时间下的模型演化及图形演示。平台框架支持运行场景设计、智能体设计、目标任务设计、一致性协议模型设计,使得平台能够支持多场景多用户运行,并能够进行友好的可视化展示和结果分析。同时用户使用时,只需进行简单的参数设置就可以进行仿真实验,使得用户只需要了解模型的使用,而无需进行专门的编程训练,从而减低了平台的使用难度,大大提高了仿真实验的效率。

平台框架设计采用分层设计的思想,把整个平台分为 4 个层次,分别为数据接口层、模板管理层、应用管理层、子系统管理层,每一层负责不同的功能,具体功能见图 1,具体描述如下。

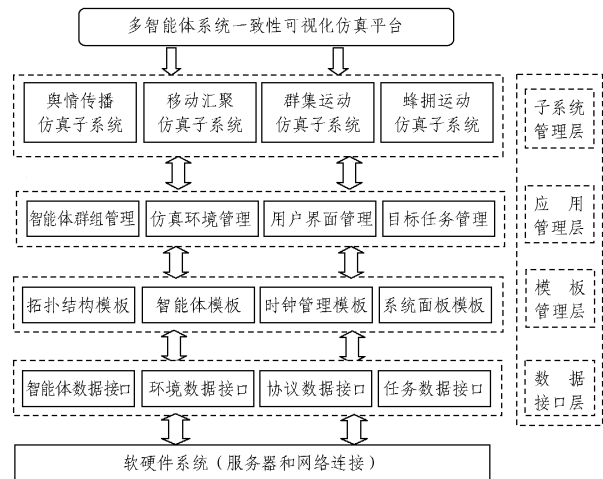


图 1 仿真平台的系统架构图

1. 数据接口层

设计方便重用的数据访问接口,要求数据访问层具有以下特性:全面性、接口命名规范、可用性、稳定性、高效性、数据处理的规范性、数据和参数高效传递。

2. 模板管理层

模板管理层是在数据接口层的基础上加入模板功能,模板只需要经过简单的初始化就可以使用,完成特定的基础功

能,从而为具体的应用提供功能保障。用户在进行系统设置时无需进行深层次编码,其简单易用,主要包含了拓扑结构模板、智能体结构模板、时钟管理模板、系统面板模板。要求模板管理层提供模板的图形化操作界面,所见即所得。

3 仿真平台工作流程设计

仿真平台工作主要流程分为两大部分,一部分为自动仿真模式的主要工作流程,一部分为用户自定义仿真模拟的主要工作流程,如图 2 所示。

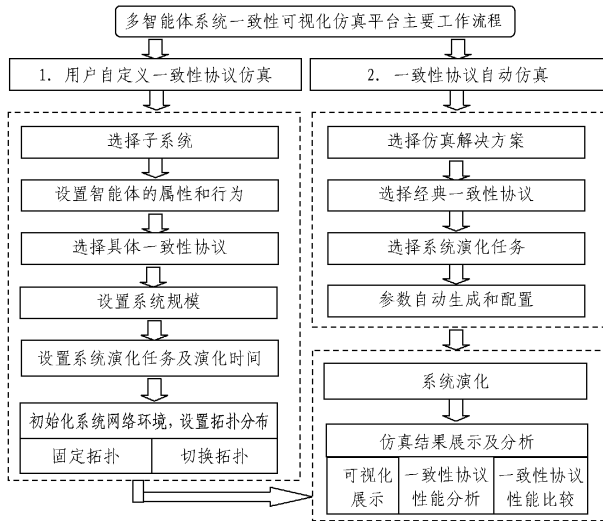


图 2 仿真平台的主要工作流程

1. 自动仿真模式

在该模式下,用户只需进行简单的选择就可以进行经典一致性协议的仿真实验。首先,用户先选择对应的解决方案,选择需要进行仿真的一致性协议,确定仿真的具体任务,则系统演化所需要的参数和数据都由系统自动生成。系统在进行演化后会生成仿真结果,整个仿真过程以可视化的图、表的方式进行友好展示,同时还对一致性协议的性能进行分析,给出具体结果。该模式主要是方便用户熟悉经典的一致性协议,不需要太多的步骤就可以得到具体的仿真结果,从而让用户更好地了解和学习一致性协议,这种模式适合初步接触该协议的研究人员。

2. 用户自定义仿真模式

在该模式下,用户首先要选择一种子系统使用,然后设置系统内智能体个体所具有的属性和方法,选择具体一种一致性协议,确定整个系统的尺寸大小,设置系统的演化任务和演化时间,最后用户需配置系统初始的运行环境,主要分为固定拓扑和切换拓扑结构两大类情况。在相关设置都完毕后,系统开始进行演化并生成仿真结果,整个仿真过程可以进行可视化展示,也可以对一致性协议的性能进行分析,同时还支持与其他类似的协议进行性能比较,性能比较的结果也是以可视化的方式进行展示。第二种模式功能较为完备,让使用者有充分的空间仿真各个关键环节的设置,使得使用者可以根据需要进行仿真实验,这种模式适合研究人员进行一致性模型的设计、验证和比较。

4 仿真平台详细设计

主要的设计方法是先进行系统环境的搭建,包括智能体、网络拓扑、任务目标、一致性协议、协议性能评价等基本要素的设计。仿真平台采用 Matlab 与 C++ 进行混合编程,利用 Matlab 的计算函数接口和强大的绘图接口进行平台的数据计算和可视化显示工作,又采用了 C++ 面向对象的特性进行智能体、网络拓扑结构等基本要素的构建。

1. 智能体的设计包含智能体的属性和方法。智能体的属性包含:种类属性、状态信息属性、群体分类属性。智能体的方法主要是指智能体所具有的能力,主要包含:移动、观点协调、信息传递、信息存储、状态演算等。

2. 网络拓扑初始分布设计主要考虑状态信息为一维或二维情况的分布,可以进行拓扑结构随机分布和均匀分布,可以指定分布的区域和分布密度,同时提供多种随机策略生成初始拓扑结构,也可指定特殊的拓扑结构。所有拓扑结构都以指定的数据格式进行存储,并采用专门的数据文件进行存储。总的来说,网络拓扑分布可以按需进行初始化,也可以根据经典的网络结构进行初始化。

3. 任务目标用来描述整个系统里的所有智能体所要进行的计划和要完成的任务,比如协商、汇聚、编队等,具体任务可以通过模板进行实例化,同时要有协调控制机制进行任务分配和协调,使得智能体可以分担部分能力范围内的任务。

4. 一致性协议的设计包含多智能体系统内所有智能体进行状态演变的规律设计以及达成一致的具体规则设计。这里实现的协议包括连续和离散时间两种模式。智能体状态演化规律可以模板的方式进行管理,设计完成后可进行协议验证,以保证每一个设计出来的协议都是正确的,这样系统才能按照协议进行演化,否则系统演化很可能无法正常进行。

5. 协议性能评价主要是对协议执行过程中的性能进行全面评价,并能够对不同协议完成相同任务进行性能比较。性能评价主要关注一些关键信息,包含协议所执行的时间、信息存储量、数据计算量、数据传递量等信息,并设计出基于这些关键信息的评价指标,使得评价有据可依,评价结果还支持可视化显示输出。当系统演化结束后,还能统计出整个过程所消耗资源的信息。

以上 5 个要素是整个仿真平台实现的关键,与仿真平台重要流程有着紧密的联系,因此设计时要注意多智能体系统协调控制一致性问题的核心所在,即通过分布式协调合作策略的执行来实现全局目标,这种分布式的合作策略应该是可调整的,同时也会因为执行环境的变化而对系统演化的结果有很大的影响。每个要素在设计过程中都要充分考虑灵活性和扩展性,使得整个平台在使用时能够很好地适应多智能体系统的这些特性,从而能够真实、快速、高效地进行系统演化的仿真和展示。为简化实验,假设智能体是同构的且个体之间的交流方式是以离散时间形式进行的,并使系统在单处理器计算环境下进行演化,所有智能个体均能同步行动。

4.1 数据接口与规范

1. 智能体数据接口

Agent			
+Kind	//智能体种类名称	+KindID	//智能体种类标识
+State	//智能体状态集合	+Group	//智能体群体分类名称
+GroupID	//智能体群体分类标识	+Id	//智能体唯一标识
+Name	//智能体名字		
+Move()	//移动	+Opioion-Consensus()	//观点协调
+Information-Transfer()	//信息传递	+SateStore()	//信息存储
+NextSate()	//状态演算		

2. 环境数据接口

Environment			
+Kind	//环境类型名称	+KindID	//环境类型 ID
+StateActive	//环境状态是否激活	+Topology	//拓扑结构
+Id	//环境唯一标识	+Name	//环境名字
+ Topology-Init()	//拓扑结构初始化	+ Load()	//读取
+ Strategy ()	//生成策略	+ Save()	//保存

3. 协议数据接口

ConsensusProtocol			
+Kind	//一致性协议类型名称	+KindID	//一致性协议类型 ID
+ ProtocolAc-tive	//一致性协议是否激活	+Id	//一致性协议唯一标识
+ProtocolKer-nel	//一致性协议核心	+Name	//一致性协议名字
+Neighbor-hood	//邻域		
+ Init()	//一致性初始化	+ Save()	//保存
		+ Load()	//读取

4. 任务数据接口

Task			
+Kind	//任务类型名称	+KindID	//任务类型 ID
+TaskActive	//任务是否激活	+TaskKernel	//任务核心
+Id	//任务唯一标识	+Name	//任务名字
+ Init()	//任务初始化	+ Run()	//任务执行
+ Interrup()	//任务中断	+ Save()	//任务保存
+ Load()	//任务读取	+ End()	//任务结束

4.2 核心模块设计

1. 多智能体系统设计与实现

一个多智能体系统可以看作是一个多元数据的结合体,在这里把它定义为

$$MASystem = (Agentset, Enviroment, Consensus Protocol, Task)$$

也就是说系统是由智能体集、环境、一致性协议、任务等四元数据所构成的,具体设计如下:

MaSystem			
+AgtentSet	//智能体集合	+Environ-ment	//运行环境
+Task	//任务目标	+ Consensus-Protocol	//一致性协议
+Time	//演化周期时间	+ID	//系统唯一标识
+Name	//系统名字	+Kind	//系统类型
+Kindname	//系统类型名		
+ Init()	//系统初始化	+ Run()	//系统演化
+ Interrup()	//系统演化中断	+ Save()	//系统演化数据保存
+ Load()	//系统演化数据读取		

2. 性能评价设计与实现

为了方便进行性能评价,首先要对重要的性能指标进行

量化分析和设计,主要有 3 个重要指标,分别是信息通讯平均量、信息存储平均量、信息计算平均量,具体描述如下:

(1)智能体的总数为 N , 运行时间为 T 。

(2)每个智能体某一时刻 k 需要与邻域成员通讯的信息量为 $Infor_Tele_No_i(k)$,在固定拓扑结构下,该信息量是固定不变的,若是切换拓扑结构则是时变的。

(3)每个智能体某一时刻 k 需要保存的信息量为 $Infor_Store_No_i(k)$,在固定拓扑结构下,该信息量是固定不变的,若是切换拓扑结构则是时变的。

(4)每个智能体某一时刻 k 需要计算的信息量为 $Infor_Calc_No_i(k)$,在固定拓扑结构下,该信息量是固定不变的,若是切换拓扑结构则是时变的。

(5)信息通讯平均量为

$$Ave_Infor_Tele = (\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^T Infor_Tele_No_i(k)) / (N * K)$$

(6)信息存储平均量为

$$Ave_Infor_Store = (\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^T Infor_Store_No_i(k)) / (N * K)$$

(7)信息计算平均量为

$$Ave_Infor_Calc = (\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^T Infor_Calc_No_i(k)) / (N * K)$$

(8)系统总体性能评价指标为

$$Performance_Mas = \alpha \times Ave_Infor_Tele + \beta \times Ave_Infor_Store + \gamma \times Ave_Infor_Calc$$

其中, $\alpha + \beta + \gamma = 1$, $\alpha, \beta, \gamma \in [0, 1]$, 这 3 个影响因子分别表示了信息通讯平均量、信息存储平均量、信息计算平均量这 3 个性能指标对系统总体性能的影响,若都取 1/3,则表示 3 种指标对系统总体性能的影响是均衡的,系统总体性能评价指标越小,达成任务所耗费资源越小,性能也就越高。

有了以上的定义和说明,就可进行一个系统的总体性能分析,也可对不同条件下相同系统的性能进行比较,还可以对不同协议的系统进行性能比较。

5 仿真平台测试与结果分析

为了验证仿真平台仿真实验和性能分析比较的效果,在这里以基于 Krause 的多智能体一致性模型^[3]作为测试例子,对智能体在相同领域的不同参数变化下进行仿真验证,参数涵盖了智能体数量规模、拓扑结构、分布密度等各种参数,并根据上节给出的各种性能指标进行计算,最后得到系统的总体性能评价和比较结果,并以图和表等可视化方式进行展示说明,系统采用离散化时间进行演化,所有智能体都能同步进行信息传递。

基于 Krause 的多智能体一致性模型是由 Vincent 等^[3]学者提出的一个动态舆论演化模型,在这个模型里,智能体只在相互之间意见相差不多的情况下才交换意见。模型里的智能体只进行局部通讯,系统的网络拓扑结构是动态变化的,从而适应了社会网络复杂多变的要求。整个系统是一个非线性系统, Vincent 在文中提出了该模型的收敛性证明。

模型的基本规则可以描述如下:网络中每一个智能体 i 的舆论值 $x_i(k)$ 为离散量,每个智能体进行下一步计算时,仅仅考虑与自身舆论值差值小于 1 的智能体 j 作为自己的邻居,在每一步演化迭代过程中,每一个智能体将所有邻居意见的算术平均值作为下一时刻的意见值。则 $k+1$ 时刻智能体

的舆论值 $x_i(k+1)$ 可表示为:

$$x_i(k+1) = \frac{\sum_{j \in N_i(k)} x_j(k)}{\sum_{j \in N_i(k)} 1} \quad (1)$$

假设智能体的个数为 400、600、800、1000, 仿真的时间为 20 步, 初始拓扑连通, 考虑不同分布情况对系统演化的影响, 主要是在无向切换拓扑情况下均匀分布时系统运动变化的仿真和性能评价情况。

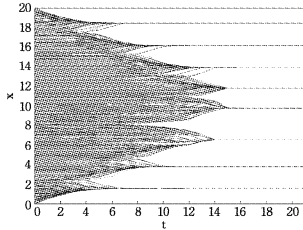


图3 400个智能体初始意见值均匀分布在区间 $L(0)=20$ 的演变过程

1. 400 个智能体的意见值均匀分布在长度为 20 的一维区间, 系统的初始网络保持连通, 最后所有智能体达成共识, 形成了 8 个观点。仿真情况见图 3。

2. 600 个智能体的意见值均匀分布在长度为 20 的一维区间, 系统的初始网络保持连通, 最后所有智能体达成共识, 形成了 8 个观点。仿真情况见图 4。

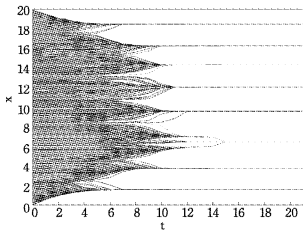


图4 600个智能体初始意见值均匀分布在区间 $L(0)=20$ 的演变过程

3. 800 个智能体的意见值均匀分布在长度为 20 的一维区间, 系统的初始网络保持连通, 最后所有智能体达成共识, 形成了 9 个观点。仿真情况见图 5。

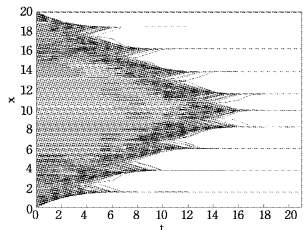


图5 800个智能体初始意见值均匀分布在区间 $L(0)=20$ 的演变过程

4. 1000 个智能体的意见值均匀分布在长度为 20 的一维区间, 系统的初始网络保持连通, 最后所有智能体达成共识, 形成了 9 个观点。仿真情况见图 6。

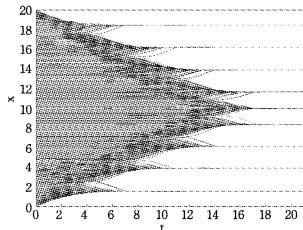


图6 1000个智能体初始意见值均匀分布在区间 $L(0)=20$ 的演变过程

5. 系统总体性能指标情况见表 1。

表1 系统性能数据

序号	智能体数	系统总体性能评价	达成观点共识
1	400	281.5	8
2	600	422.5	8
3	800	561.7	9
4	1000	702.5	9

(1) 对于智能体数为 400 和 600 的智能体系统而言, 在区间 20 范围内都达成了 8 个观点, 因此可进行性能比较, 智能体数为 400 的系统总体性能要比 600 个智能体的系统总体性能高。

(2) 对于智能体数为 800 和 1000 的智能体系统而言, 在区间 20 范围内都达成了 9 个观点, 因此也可进行性能比较, 智能体数为 800 的系统总体性能要比 1000 个智能体的系统总体性能高。

以上数据表明, 对于相同的任务目标, 数目越多的智能体越不会导致系统快速收敛, 反而越有可能导致系统收敛性能的损失。

结束语 本文设计了一种通用的大规模多智能体一致性协议可视化仿真控制平台, 给出了仿真平台的整体架构。平台能够高效地再现系统的演化过程, 快速进行一致性模型的仿真实验, 能模拟大规模数量下的各种类型的多智能体系统进行协同控制, 模拟和评估各项任务的完成情况, 为算法的完善修正提供坚实的基础。平台还能将整个过程进行图形化显示, 对于使用者而言, 平台使用简单, 无需进行编程, 只需要进行参数设置就可以进行相应的实验, 从而提高了仿真实验的效率。平台的建立为一致性协议性能评测、性能优化提供了研究保障。

参考文献

- [1] Katia P. Sycra. Multiagent systems[J]. AI Magazine, 1998, 19(2):79-92
- [2] 段俊花, 朱怡安, 钟冬. 群智能在多智能体系统中的应用研究进展[J]. 计算机科学, 2012, 39(6):6-9
- [3] Blondel V D, Hendrickx J M, Tsitsiklis J N. On Krause's Multi-Agent Consensus Model With State-Dependent Connectivity [J]. IEEE Trans. Automatic Control, 2009, 54(11):2586-2597
- [4] Reynolds C. Hocks, herds, and schools; A distributed behavioral model[J]. Computer Graphics, 1987, 21(4):25-34
- [5] Gazi V, Passino K M. Stability analysis of social foraging swarms[J]. IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics-Part B: CYBERNETICS, 2004, 34(1):535-557
- [6] 谢光强, 章云. 多智能体系统协调控制一致性问题研究综述[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(6):2035-2039
- [7] Juan V G O M, Miguel L. A scalable multiagent system architecture for interactive applications [J]. Science of Computer Programming, 2013, 78(6):715-724
- [8] Keizo M. Distributed-Controlled Multiagent Mobile Platform with Digital Actuation Concept for Space Applications[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2011, 24(3):389-396
- [9] North M J, Howe T R. Simulation of a vehicle traffic control

network using a fuzzy classifier system[A]//Proceedings of 35th Annual Simulation Symposium[C]. San Diego:IEEE Computer Society,2002;285-291

- [10] Gutknecht O, Ferber J. The MadKit agent platform architecture [A]//Proceedings of International Workshop on Infrastructure for Scalable Multi-Agent Systems[C]. Barcelona:IEEE Computer Society,2000;13-15
- [11] Silva L M, Simoes P, Soares G. JAMES: A platform of mobile agents for the management of telecommunication networks[A]//Proceedings of 3rd International Workshop on Intelligent Agents for telecommunication Applications[C]. Stockholm; Lecture Notes in Artificial Intelligence, 1999(1699);77-95
- [12] Inchiosa M E, Parker M T. Overcoming design and development challenges in agent-based modeling using ASCAPE [A]//Proceedings of Sackler Colloquium on Adaptive Agents, Intelligence, and Emergent Human Organization-Capturing Complexity through Agent-Based Modeling[C]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, California, 2003(99);7304-7308
- [13] North M J, Howe T R. The Repast Symphony Runtime System

[A]//Proceedings of Agent[C]. 2005(10);13-15

- [14] Tisue S. Netlogo: Design and implementation of a multi-agent modeling environment[A]//Proceedings of Agent[C]. Chicago: Argonne National Laboratory, 2004(10);3-13
- [15] 曹慕昆,冯玉强. 基于多 Agent 计算机仿真实验平台 Swarm 的综述[J]. 计算机应用研究, 2005, 22(9):1-3
- [16] Railsback, Steven F, Lytinen, et al. Agent-based simulation platforms; Review and development recommendations [J]. Simulation-Transactions of the Society for Modeling and Simulation International, 2004, 82(9):609-623
- [17] McFadzean D, Stewart D, Tesfatsion L. A computational laboratory for evolutionary trade networks [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2001, 5(5):546-550
- [18] 熊慕舟, 骆文振. 一种基于多 Agent 的人群仿真多机并行平台研究[J]. 计算机工程与科学, 2012, 34(10):64-67
- [19] 周文安, 陈微, 陈思, 等. 基于 MATLAB 的 LTE 仿真平台 CoMP 功能的设计与实现[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(11):2259-2263
- [20] 周昊, 覃征, 邢剑宽. 基于多 Agent 的多无人机协同决策算法仿真平台设计[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(3):587-593

(上接第 129 页)



图 12 数学 3,6,8 手势图

结束语 根据对手部解剖结构及运动的约束关系的研究,建立了基于多线谱控制的肌肉模型。该方法可以灵活控制单指运动及多指协同运动。同时针对以往传统模型单指运动独立、缺乏约束而导致不够真实的情况,进一步采用多条肌肉的多线谱间的约束关系,使得手部运动效果更加逼真,避免了仿真运动与实际运动不符合的问题。实验结果表明,所建立的手部控制机制合理,驱动所需数据仅为肌肉归一化收缩量,数据量小、仿真较便捷,同时利用肌肉间多线谱约束关系图能够保证手部运动仿真的真实感和自然性。后续将进一步研究用多线谱控制各种手势,进而将其更好地应用于手语的合成、机器人手的精确抓取、手部残疾者的康复训练、临床医学中假肢的设计、矫形手术的训练等领域。

参 考 文 献

- [1] 李锋,叶铭,等. 人手部骨组织建模的 B 样条拟合方法研究[J]. 计算机仿真, 2009, 26(9):184-186
- [2] Shimada N. Hand gesture estimation and model refinement using monocular camera-Ambiguity limitation by inequality constraints[A]//Proc of The 3rd Conf. on Face and Gesture Recognition[C]. Nara, Japan; [s. n.], 1998;268-274
- [3] Davis J, Shah M. Towards 3D Gesture Recognition[J]. International Journal of Pattern and Artificial Intelligence, 1999, 13(3);381-393
- [4] 饶敏,周淑秋,宫可想. 手部运动计算机仿真的实现[J]. 计算机技术与发展, 2006, 16(4):28-432

- [5] 侯文生,杨琴,张绍祥,等. 虚拟手可可视化模型的初步研究[J]. 中国临床解剖学杂志, 2008, 26(6):616-618
- [6] Shotton J, Fitzgibbon A, Cook M, et al. Real-time human pose recognition in parts from single depth images[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2011
- [7] Girshick R, Shotton J, Kohli P, et al. Efficient regression of general-activity human poses from depth images[C]//International Conference on Computer Vision, 2011
- [8] Keskin C, Klraç F, Kara Y E, et al. Real Time Hand Pose Estimation Using Depth Sensors[C]//Advances in Computer Vision and Pattern Recognition, 2013;119-137
- [9] 邵宏伟,贺缨,雷霆,等. 冷刺激下食指运动学及动力学特性研究[J]. 应用生物力学, 2010, 25(4):308-312
- [10] 于洪,姜力. 基于杆组法的假手食指运动学与静力学分析[J]. 机械制造, 2011, 49(565):10-12
- [11] van der Hulst F P J, Schätzle S, Preusche C, et al. A Functional Anatomy Based Kinematic Human Hand Model with Simple Size Adaptation[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2012;5123-5129
- [12] 文乐军. 人体解剖学[M]. 北京:北京医科大学出版社, 2004;83-101
- [13] 王澍寰. 屈指肌腱与腱鞘的功能解剖[J]. 骨与关节损伤杂志, 1989, 4(4):193-196
- [14] Claudia, Nolker, Ritter H. Parametrized SOMs for hand posture reconstruction[C]//Proceedings of the IEEE-INNS-ENNS International Joint Conference on Neural Networks, 2000;139-144
- [15] Lin J, Wu Ying, Huang T S. Modeling the Constraints of Human Hand Motion[A]//Proc Workshop on Human Motion (HUMO'00)[C]. Austin, TX, 2000;161-170
- [16] 唐好选,洪炳熔,刘伟. 人手的运动学仿真及基于知识的控制方法[J]. 高技术通讯, 2001, 10:61-65