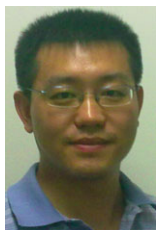


CGF 中的协同行为建模技术

冯磊^{1,2}, 查亚兵², 胡记文², 尹全军²

(1.北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094; 2.国防科学技术大学机电工程与自动化学院, 长沙 410073)



摘要: 协同行为建模技术是计算机生成兵力的重要研究内容, 也是作战仿真中人类行为表示是否准确、仿真结果是否可信的关键所在。根据国内外研究现状和需求分析, 针对现有协同行为模型的不足, 提出了具有协同行为能力的 CGF Agent 认知体系结构, 设计了协同行为建模框架, 重点阐述了各子模块间的相互关系及其关键实现技术。文章最后讨论了协同行为建模技术的发展趋势和应用前景。

关键词: 作战仿真; 计算机生成兵力; 人类行为表示; 组织本体; 协同; 协作; 协商; 通信
中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2013) 04-0591-08

Cooperative Behavior Modeling Technology in CGF

FENG Lei^{1,2}, ZHA Ya-bing², HU Ji-wen², YIN Quan-jun²

(1. Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China;

2. School of Mechatronics and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Cooperative behavior modeling technology plays an important role in research of computer generated forces; it is also the key ensuring the validity of human behavior representing (HBR) and the credibility of results in combat simulation. According to requirements and the state of art of existing research, firstly a CGF Agent cognitive architecture with cooperative behavior capability was brought forward, then a cooperative behavior modeling framework was designed, detailed discussion about the correlations of each sub modules and their key implement technologies were given. Finally, the direction and foreground of future work was concluded.

Key words: combat simulation; Computer Generated Forces (CGF); Human Behavior Representing (HBR); organization ontology; cooperation; collaboration; negotiation; communication

引言

军用仿真主要包括武器装备仿真和作战仿真两大部分^[1]。作战仿真是指构建相应的模型和规则, 通过计算机仿真的方法对作战进行再现、推演和分析^[2]。在作战仿真系统中, 一个重要方面是对计算机生成兵力的应用。计算机生成兵力(computer generated forces, CGF)是由计算机创建并能对其全部或部分动作和行为实施自主控制或指导的虚拟作战兵力对象^[3]。CGF 中兵力行为表示的准确与否是作战仿真中人类行为模型是否真实、仿真运行结果是否可信

的关键所在。

信息化武器装备的发展与运用催生一种新的作战样式——一体化联合作战。由于联合作战参战军兵种多元, 指挥关系复杂, 要取得合力制敌的作战效果, 必须要求各军兵种的各种作战行动保持高度协调一致, 达到协同作战。协同作战是指所有参战人员为达成同一作战目的, 按照统一意图和统一计划, 在统一指挥下, 在任务、地点、时间和方法上协调一致的作战行动^[4]。可见, 在作战仿真中, 忽略了对协同作战行为的表示, 将不能真实地反映实际战场行为, 也就使得作战仿真结果可信度大打折扣。因此, 模拟作战实体在各种约束条件下, 根据当前的态势实现协同作战是实现逼真人类行为建模的重点。

目前, 国内外已研究了一些 CGF 行为建模理论和方法^[5-8], 开发了一些具有协同行为能力的行为模型, 发挥了积

收稿日期: 2011-04-14 修回日期: 2011-11-12
基金项目: 国家自然科学基金 (60904055), 国家部委基金资助项目 (9140A04010110KG0110)。
作者简介: 冯磊(1982-), 男, 山东曲阜, 博士生, 研究方向为系统建模与仿真; 查亚兵(1968-), 男, 江西九江, 博导, 教授, 研究方向为系统建模与仿真、VV&A。

极的作用。但已有模型大多支持单一作战任务,模型可扩展性和剧情可移植性不能灵活应对作战任务多样化的需求,限制了模型在其它作战仿真系统中的应用,重用性不高。同时,现有协同行为模型大多只采用了简单的规则,实现了反应式的协同行为,模型粒度较粗,无法应对战场环境下各种不可预测的行为冲突等情况,离作战仿真对协同作战行为过程描述的逼真度要求还存在较大差距,甚至会出现行为的失真。

本文在国内外研究现状和需求分析的基础上,针对现有协同行为模型的不足,提出了具有协同行为能力的 CGF Agent 认知体系结构,研究了协同行为建模框架及各模块间的相互关系,重点阐述了其中的关键实现技术。文章最后简单讨论了协同行为建模技术的发展趋势和应用前景。

1 研究现状与分析

美国国防部建模仿真办公室(DMSO)在其提出的建模仿真综合计划(MSMP)中将获得权威的人类行为表示(HBR)列为国防部建模仿真的六大目标之一^[9]。根据这一目标,美国国家研究委员会(NRC)专门成立了一个人类行为建模小组,对作战仿真中的 HBR 进行广泛深入的研究。在 HBR 的研究中,包括 CGF Agent 认知体系结构、态势感知、决策、规划、记忆和学习、协同等方面的研究。这里我们主要深入探讨协同行为建模方面的研究成果和现状分析。

随着信息化技术和武器装备的迅速发展,军队作战规模在不断扩大,尤其是一体化联合作战中各军兵种之间协同的重要性也日益凸显。因此,如何能够在有众多实体参战的作战仿真中表现这种协同行为已越来越成为国内外研究团体和个人的研究热点。近年来,研究者基于多 Agent 技术提出了多种团队协作理论和协作框架,并进行了一定的应用。

1.1 国外研究现状

1.1.1 协同行为建模理论

在理论研究方面,最具代表性的协同行为理论是 Cohen & Levesque^[10,11]于 1990 年提出的 Joint Intention(联合意图)理论。联合意图理论框架关注于团队的联合心智状态,如共同信念、联合目标、联合意图等。为了在一个团队中实现有效的协作,需要在团队的所有成员间建立联合目标。而且,避免动态过程中协作失败的关键是所有的团队成员需要建立一个持续承诺——认为某个联合行动已经实现、不可能实现或行动的持续条件不成立时,将这一情况通知团队内的其它成员。基于联合意图的团队协作具有如下优点:联合意图中的承诺可以为实体提供一个对协作

活动中协调和通信进行推理的原则框架;联合意图中的联合承诺可以引导实体对团队行为进行监控和维护;联合意图可以明确地表示团队行为,从而进行团队协作的推理。

由于现有基于联合意图的模型只给出了协同过程的局部描述。从应用的角度来看,缺乏对联合行动失效以及在此情况下团队和个体应该如何应对的描述。为解决上述问题, Jennings^[12]于 1992 年在其博士论文中提出了 Joint Responsibility(联合责任)理论,用于描述当出现下列情况之前,团队都应该承诺维持当前的联合目标:联合目标已经实现或已无法实现;现有行动已失去意义;行动虽然按计划进行但已不能达到预期目标;行动序列中的某一行动已不能完成等。当出现上述情况时,团队成员不再承诺已有的联合行动,但其有责任告知团队中其它成员以确保整个团队对当前状态改变的认知。这使得团队可以对联合行动进行重新评估和确立,确保协同行为的一致性。

Grosz & Kraus^[13,14]于 1996 年提出了 Shared Plan(共享计划)理论。与联合意图理论不同,共享计划理论并不是基于联合心智状态,而是基于意图,即通过实体常规意图采取行动。然而,单个实体的意图常常受到团队其它协同实体行动或者团队联合行动的制约。因此,共享计划理论致力于在协同过程中描述整个团队的意图和信念。其包括全局共享计划和部分共享计划,当需要采取协同行为时,团队往往只具有部分共享计划,必须通过通信和规划达成全局共享计划。

另外, Kinny^[15]于 1992 年提出了 Planned Team Activity(有计划的团队行动)理论,该理论除了描述个体信念、目标、计划和意图,还规定了团队中的 Agents 还应该具有:(a)有关环境和其它实体行动的共同信念;(b)需要达到的联合目标;(c)可以满足联合目标的联合计划;(d)以及建立联合目标后用于响应外部事件的已承诺的联合计划。

1.1.2 协同行为建模框架

上述各种具有代表性的协同行为理论为团队协同行为模型的建立提供了设计规范。近年来,研究者依据上述各种理论,建立了用于各种目的的协同行为框架,为具有协同行为能力的实体行为建模提供了切实可行的途径。

由 Milind Tambe 教授领导的 Teamcore 研究小组,基于联合意图理论和共享计划理论开发了通用的协同行为框架 Steam^[16-18],该框架可以对团队目标、计划和联合承诺进行明确的表示,可以实现多于 2-3 个实体的协同,同时考虑了通信代价问题。将实体的协同过程分为以下几个阶段:(1)团队算子的建立,用于形成联合意图;(2)团队算子的执行,用于执行算子所表示的联合行动,维护团队状态;(3)

团队算子的执行监控和重新规划,用于对团队行为执行的监控,在必要时进行重新规划以适应战场突发情况。

另一个具有代表性的协同行为框架是由 Jennings 等人提出的 GRATE^[19],该结构在充分描述了信念、愿望、意图等概念的基础上,为了表示多实体之间的协作,引入了联合意图。GRATE 的 Agent 体系结构分为两个部分:领域层和协作控制层。领域层处理领域内的问题。协作控制层对领域层进行控制,实现领域层的行为和其它实体行为的协调。协作层包括三个主要的问题求解模块:控制模块负责处理和领域层的接口;情景评估模块决定本地需要执行的动作以及和其它实体的协作;协作模块处理虚拟实体的社会行为,包括新交互的建立、正在进行的合作行为的维护,以及对其它实体发起协作的响应。

Rich & Sidner 基于共享计划理论设计开发了 COLLAGEN^[20]原型框架,此框架主要用于面向具体的空运安排任务建立协作接口实体,并将所操作的实体看作一个黑箱。该框架的实现便利了用户与黑箱(实体)之间的交流。

PGP^[21]是由 Durfee & Lesser 共同开发的协同框架,该框架没有相应的协作理论作支撑。PGP 的早期应用主要是操作实体实现对分布式传感器网络的数据集成。其中,下级实体可以根据数据分布彼此交换任务目标和行动计划,主管实体则可以利用局部全局计划监控到不同实体的任务计划,并最终服务于团队目标。PGP 是规划协同行动的基础,它可以传输命令指导个体行动。

GGP^[22]是 Decker & Lesser 在 PGP 基础上提出的通用协同框架,该框架提供了许多独立的协同模块,这些模块的任何一个子集都可进行组合来响应任务环境对协同的需求。

COOL^[23]是 Barbuceanu & Fox 基于实体间义务的概念建立的协同行为框架。但该框架的思想与联合目标、联合承诺等概念相悖,也不能很好地解决协同中存在的一些问题。

1.1.3 实际系统应用

在实际的系统应用方面,基于联合意图的 Steam 协同行为框架成功应用于美国军方 STOW-97 系统中的协同直升机攻击子系统以及协同直升机运输子系统中,同时也应用到了 Robocup-97 虚拟球员的协同行为中^[16]。另外,GRATE 模型也在工业部门的电气传输网络故障检测与定位,以及粒子加速器束束控制的协同诊断中得到了成功应用^[19]。

1.2 国内研究现状

国内有关协同行为的研究大都集中在人工智能领域,主要是基于多实体进行动态协作任务的求解,用于解决多实体之间的协调合作与共同适应问题,在此不一一赘述,具体可参见石纯一^[24],贾利民^[25]等人著作。得益于人工智

能技术的飞速发展,将基于多实体的协同行为研究应用于作战仿真中的人类行为表示已逐渐成为研究热点。

郭齐胜^[5]论述了目前实现协调与协作困难的主要根源。为克服该问题,提出必须给每个主体建立相关的协调协作模型。模型不仅要描述合作过程按规划正常进展时主体的行为,也必须说明意外事件发生时应如何处理。

尹全军^[3]在其博士论文中首先提出了基于多 Agent 系统的组织观点,建立了虚拟实体的组织模型。并基于联合意图理论,结合虚拟实体之间的组织关系和通信条件,重点研究了虚拟实体协作方法,建立了多种协调机制相结合的指挥控制协作模型。

杨建池^[26]重点对通用的协作模式进行了研究,并采用多 Agent 理论对作战协同进行建模,构建了一套通用的多虚拟实体协作理论体系。

宋一兵^[27]提出基于角色和任务构建虚拟实体的组织模型,并将角色和任务有机地结合在一起,解决了角色、任务和个体的动态匹配问题,并建立了基于 HLA 的仿真训练系统,使计算机生成的兵力表现出一定的协同智能行为。

孙珠峰^[28]采用协同学理论来分析舰艇协同反潜态势问题,在基本协同网络的基础上建立了一种广义协同网络模型,提出了该模型的实用快速算法,并最终用于具有多舰艇目标反潜仿真能力的舰艇仿真系统。

刘金琨^[29]将多 Agent 理论应用于多机空战过程的复杂动态环境中,并利用多 Agent 协作问题求解机制建立了多机协同作战智能决策系统,从而实现多机协调作战的智能化,使多机在作战中采用最优方位和方向。

1.3 存在的不足

可见,国内外在基于 Agent 的 CGF 协同行为建模的研究方面已经取得了一定成果,并进行了实际应用,但同时也存在一定的缺陷,具体表现在:

实际作战过程中的协同方式和协同手段,是有一定组织约束的,参战人员必须严格按照条令条例进行协同。已有的协同行为模型具有一定的理论基础,研究者也提出了许多有效的协同行为模型表示手段,但却忽略了对这种组织约束下的协同行为进行建模,这样的模型不能体现出行为建模对逼真度的要求,仿真结果的可信度达不到应用需求。

战场环境是复杂、动态和不确定的,当有突发或者不可预测的情况出现时,参战人员必须根据当前态势,实时调整协同策略,并及时采取进一步的行动,否则将贻误战机。因此,必须对这种不确定情况下的行为处理进行建模。已有的协同行为模型绝大多数只是采用反应式规则建立,只能针对模型中已知的当前状态采取行动,当有突发或不

可预测的情况出现时,系统中的虚拟实体则无法进行推理。这样的协同行为模型无法为作战仿真系统提供有效的数据支撑。

由于作战环境非常复杂,各种各样的突发情况常常会导致作战任务的失败,此时指挥官需要重新进行兵力编组和任务调整。上述模型仅对固定编组和任务下的协同作战行为进行了表示,而缺乏对面向任务的组织动态形成过程以及组织动态重构特征的描述。

从实际应用角度来讲,目前已应用的协同行为模型中,几乎都未将模型拓扑结构与数据分离,也未将建模环境与运行环境分离,这会使得已实现的模型只能支持单一的作战任务数据和运行环境,当任务改变后,需要重新设计模型拓扑结构和编写代码,模型重用性差,也使得仿真系统使用效率低下,不利于大规模的作战仿真。

针对上述突出问题,我们必须在理论研究上寻求进一步的突破,重点研究协同行为建模理论和方法,使得模型可以逼真地反映出实际作战过程中的协同行为;在模型实现上,不仅要协作过程按规划正常进展时虚拟实体的行为进行建模,还要针对意外或冲突事件发生时的行为进行建模。同时,还要对该模型进行模块化设计,满足作战仿真对模型可重用和可扩展的要求。

2 具有协同行为能力的 CGF Agent 认知体系结构

图 1 所示为课题组设计的人类行为建模(Human Behavior Model with Prediction, Variability and Cooperation, PVC_HBM)认知体系结构。该体系结构不仅具备认知行为模型的基本功能模块,如态势分析、推理决策、规划、学习等(在此不一一赘述,详见文献[5]),还具备对手意图、个体差异和协同行为模块,使得基于该体系结构构建的 CGF Agent 行为模型不仅能够反映实体的基本行为,还能够体现战场中人类的个体差异性、前瞻性和协同性等行为特点,具有更高的行为逼真度和可信性。

前瞻性^[30](Prediction):是指作战双方会根据当前战场态势、敌方特征和敌方可能的行动目标预测敌方下一步可能的行动,从而在己方的决策中预先有针对性的加以应对的行为特点。对手意图模块就是在 CGF 实体行为模型内部建立对手模型,根据所感知的对手作战行动和所处的态势信息来推断对手的作战意图,预测对手将要采取的行动,并采取有效的应对策略。

个体差异性^[31](Variability):是指由于心理因素、生理因素的影响,以及作战经验、训练水平等的差别,不同个

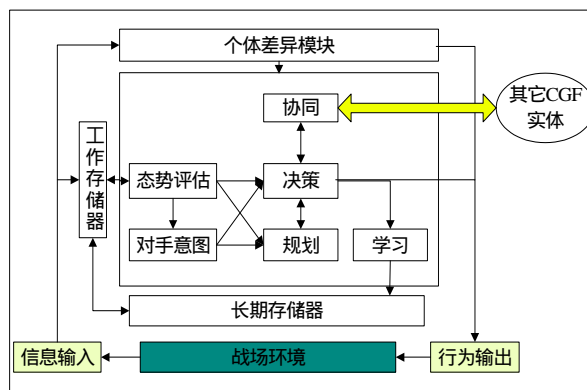


图 1 PVC_HBM 认知体系结构

体即使在面临相同情况时,也会做出不同决策或行为的行为特点。个体差异模块对虚拟实体整个认知过程产生影响,使得 CGF 实体能够产生具有个体差异特征的逼真行为。

协同性^[32](Cooperation):是指作战人员能够在自身无法单独完成某项任务或者接收到其它人员的作战请求时,能够形成统一的团队去完成共同目标的行为特点。当 CGF 实体在自主决策后需要其它实体协助去完成某一任务或者响应其它 CGF 实体的协助请求时启动协同模块。

3 协同行为建模框架

本部分将在上述认知体系结构基础上,给出协同行为模型的框架组成,并详细阐述其中各子模块的关键实现技术。

3.1 模型框架组成

图 2 所示为 CGF Agent 个体的协同行为建模框架(cooperation behavior modeling framework, CBMF)。CBMF 框架总共分为四层:任务层,组织层,协同层,通信层。

任务层包括团队任务子模块,负责接受上级任务或者团队所形成的团队目标。

组织层包括组织形成与任务分配子模块,负责协同任务执行前的任务分配。组织本体主要根据实际作战组织的静态结构和动态行为关系建立起组织关系约束;组织形成与任务分配子模块根据组织的网络特征进行任务组织的形成,并根据任务分解情况和任务组织的角色关系进行动态任务分配。

协同层包括协作行为和协商行为子模块,负责协同任务执行过程中的行为处理。当团队任务分配完成后,则执行任务。在执行任务过程中,当某一 CGF 实体无法单独完成任务需要其它 CGF 实体进行协同时,则进入协同层,基于联合意图和共享规划模型进行协作行为的选择;或者在遇到冲突时,基于辩论模型进行协商行为的处理。

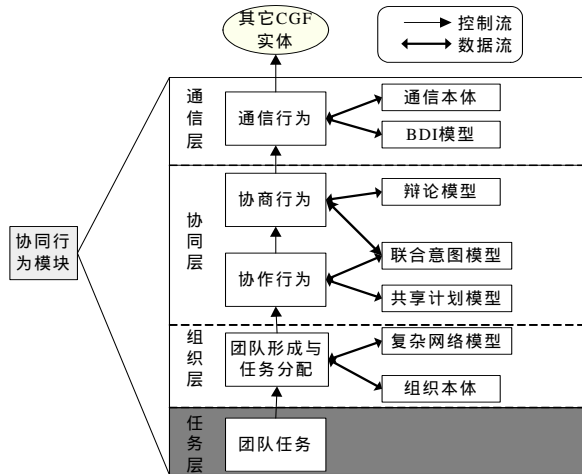


图 2 协同行为建模框架

通信层包括通信行为子模块,负责通信行为的决策和选择。基于 BDI 模型分析作战单元在战场环境下产生通信的条件,将个体决策特征引入到 CGF Agent 通信过程中来,并基于统一的通信本体语言与其它 CGF 实体进行通信,从而使作战兵力通信行为模型更符合人类的通信模式。

3.2 关键技术研究

3.2.1 组织建模

组织是现代作战中的重要组成要素,现代作战大多是在组织约束下的行为。因此,为了能够准确地对 CGF 实体行为进行表示,正确地建立组织模型是关键所在。

目前,国内外在组织建模方面的研究主要存在两种观点:一种来自于社会科学,另外一种来自于可计算组织理论以及人工智能。基于社会科学观点的研究^[33,34],能够对组织静态结构的细节进行抽象描述,但不能表示组织动态方面及其与结构的关系。基于可计算组织理论以及人工智能观点的研究,虽然能够对组织的静态结构和动态行为进行抽象描述,但只局限于对组织角色、小组和整体进行简单的三层抽象,如 GAIA^[35]、MOISE^[36]、AGR^[37]、OperA^[38]等模型,远远满足不了现代作战组织复杂的层次化、网络化等特征。

为了解决上述问题,文献[39]将本体理论引入作战仿真并进行了组织建模的研究。首先,结合军事领域进行组织本体构建的需求分析;其次,在一定的开发原则基础上,定义组织静态结构和动态行为方面的共享概念及概念间的关系。接着,选择合适的本体描述语言对组织本体进行编码、形式化,以便于本体模型自动进行逻辑推理及检验。组织本体的构建可以为 CGF Agent 行为模型的开发提供一致的组织术语结构和描述框架,为不同的行为建模人员提

供共享和可重用的组织知识,以实现不同行为模型之间的互操作和集成。同时,行为建模人员可以根据需要实例化具体的组织,使得基于该组织模型所建立的个体、群体等行为模型在组织行为的约束下表现得更为真实、可信。

组织模型的建立,一方面可以更加真实地模拟作战过程中组织因素对作战效能的影响;同时,可以在仿真中更为真实、高效地实现 CGF 实体之间的协同作战行为过程。

3.2.2 任务组织形成与动态任务分配

在现代高技术条件下,敌我双方很少以常规编制投入作战,很多情况是面对具体任务,抽调相关兵力进行合成编组,组成更有针对性的临时任务组织。任务完成后,组织解散;或任务失败后,重新编组。另外,由于军队组织形式的特殊性,其具有组织严密、结构紧凑、责权分明、约束较强等特点。因此,依据军队组织结构的特点和所构建的任务协同组织本体,研究面向任务的协同组织形成方法是协同行为建模研究需要解决的关键问题。组织形成过程可分为两个步骤:

第一,任务分解。任务分解可以有不同的策略,如按物理时空进行分解,按任务的技术功能进行分解,按动态和静态特性进行分解等。任务分解与任务大小、任务复杂程度以及应用领域有关,需要作具体分析。根据当前一体化联合作战样式多样,协同任务多等特点,本项目将研究采用按任务的技术功能进行分解的方法,遵循任务的独立性原则,对实现任务 T_i 与 T_j ($i \neq j$) 没有资源冲突的情况,优先分解,这有利于组织的快速形成,提高协同效率。

第二,组织形成。根据任务分解树和已有组织结构,研究并给出初始角色和角色关系集合,建立起任务集合到能力集合的映射函数,完成任务分解树向组织结构的映射。

文献[40]基于复杂网络理论和多 Agent 理论,从网络观点出发,在对作战组织特征进行网络化描述基础上,通过一种动态网络组织形成算法建立起组织模型,和已有算法^[41]相比,该模型不仅能真实地反映作战仿真中的组织特点,同时该算法还能较快地完成组织形成过程,算法复杂度较低。

面向任务的组织形成后,根据组织内部的角色划分,将每一个角色指定给相应实体的过程称为任务分配。由于军队组织高度的纪律性和服从性,导致了其任务分配方式不是商讨式或是采用自由承担的方式,而大多是以直接命令的形式进行任务分配,而且往往是把任务分配给相应能力最强、最合适的人选。因此必须依据角色需求,研究对候选实体进行综合素质评估和排序的方法,进而将任务分配给最能够胜任的实体。文献[42]研究采用基于效用的个体综合能力和素质评估与排序方法。假设子任务 T_j 需要寻找

虚拟实体承担时，候选实体 a_i 对于任务 T_j 的效用 $U^*_{a_i T_j}$ 可以用下式计算：

$$U^*_{a_i T_j} = W(a_i, T_j) [\text{experience}(a_i, t), \text{ability}(a_i, T_j, t), \text{mental}(a_i, t)] \quad (1)$$

其中

$$W(a_i, T_j) = \begin{bmatrix} W_{\text{experience}, a_i, T_j} \\ W_{\text{ability}, a_i, T_j} \\ W_{\text{mental}, a_i, T_j} \end{bmatrix}$$

且 $W_{\text{experience}, a_i, T_j} + W_{\text{ability}, a_i, T_j} + W_{\text{mental}, a_i, T_j} = 1$ 。

该方法中个体当前的综合素质评估考虑了实体过去完成类似任务的经历 $\text{experience}(a_i, t)$ 、实体完成当前任务的能力素质 $\text{ability}(a_i, T_j, t)$ 以及实体当前的心智状态 $\text{mental}(a_i, t)$ ，并分别利用 $W_{\text{experience}, a_i, T_j}$ ， $W_{\text{ability}, a_i, T_j}$ ， $W_{\text{mental}, a_i, T_j}$ 来表示这三个方面对效用的影响权重。

3.2.3 团队协作

任务执行过程中，当 CGF Agent 接受其它实体的协作请求或者面对所分配的任务无法单独执行时，则需要进行协作。已有的仿真应用中，实现 CGF Agent 协作的传统方法是每个 Agent 加入领域相关的各种任务协同计划，这种方法不仅工作量大，而且大多只实现了反应式的协作行为，同时支持的作战任务单一，可重用性不高。尤其是在面临突发情况时，容易造成协作任务的失败。联合意图^[11]和共享计划^[14]理论为上述问题的解决提供了一套行之有效的方法。根据联合意图理论，可将协同过程分为三个步骤：(1)联合目标的建立；(2)团队状态监控与维护；(3)重新规划。

· 联合目标的建立：一个团队 Θ 的联合目标建立在联合承诺的基础上，一个联合承诺可以看作是一个联合持续目标 JPG 。如果一个团队 Θ 的联合持续目标是为了达到一个团队行动 p ，可以定义为 $JPG(\Theta, p)$ 。为了建立一个团队的 $JPG(\Theta, p)$ ，可以采用需求-确认协议，并进行相应修改来满足协作过程真实性的需要。

· 团队状态监控与维护：联合目标确立后，为了保证协作的顺利进行，CGF 实体需要具有团队状态的监控能力；当组织内的某个 CGF 实体所承担的任务无法完成时，该实体还要进行组织状态的维护。为了达到上述目标，需要设计并实现团队的状态监控与维护算法。

· 重新规划：重新规划的过程，实际就是进行组织重构的过程。即当联合目标终止后，上级将根据当前的实体综合素质评估和组织结构重新进行组织的形成和任务分配。上述功能和循环的实现，便实现了 CGF 实体的重新规划能力。

文献[16]根据上述理论和方法实现了 steam 协作行为

框架，为通用的协作行为模型的实现提供了思路和方法。

3.2.4 团队协商

协同过程中，战场环境的复杂性、动态性和不确定性会导致行为冲突^[43]。例如，其它 CGF 实体发给自身的信息可能与自身信念存在冲突；或者自身观察的信息与团队的协作信念存在冲突等；已有模型的协作计划中大多未实现类似冲突行为的处理，当遇到不可预测的行为冲突时，模型则无法进行判断和决策，导致协同计划的失败、协同行为的失真。因此，为了逼真地表示人类战场行为，必须在协同行为表示过程中建立起有效的冲突消解模型。

目前，协同行为表示中的冲突消解主要分为可通信和不可通信两种情况。在可通信情况下的冲突消解主要是采用基于协商的方法^[44-46]，常用的协商机制包括：基于拍卖的协商，基于对策论的协商，基于启发式的协商，基于兴趣的协商，基于辩论的协商。文献[47]对各种协商机制的优缺点进行了详细的论述，基于辩论的协商是目前研究比较广泛且符合人类解决冲突行为习惯的一种方式。文献[48,49]在综合已有成果和大量研究的基础上，实现了协作型 CGF 实体的协商模型 CONSA，该模型基于对策推理，在检测到冲突时首先利用代价-效益分析来确定是否进行协商辩论，并在辩论过程中对论据强度进行了定性的划分。但该模型主要从个体自身角度考虑是否进行协商辩论，不能确保团队协商的一致性。论据强度的定性划分过于简单，不利于辩论决策，增加了辩论过程的复杂度。针对上述问题，作者提出了一种基于辩论的协作型 CGF 分层协商模型，如图 3 所示。

该模型首先基于 BDI 理论对协同过程中检测到的冲突

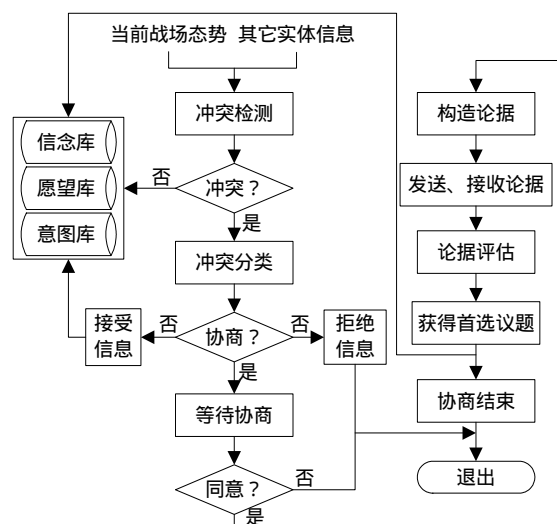


图 3 冲突下的协商流程

种类(信念冲突, 愿望冲突和意图冲突)进行了分层, 并基于联合意图理论建立了团队成员是否进行协商的判断标准; 其次, 在辩论过程中实现了基于效用理论的论据强度定量评估算法, 用于获得首选议题; 最后, 将协商结果发给团队的所有成员, 并更新自身知识库。利用上述模型进行仿真, 可以有效地处理 CGF Agent 产生的行为冲突, 保证协同过程中的协商一致性, 真实地反映了战场冲突下的人类行为方式。

3.2.5 团队通信

真实战场中, 通信是作战协同得以顺利实现的基础和产生的手段。通过通信, 作战人员可以了解其他作战人员的当前状态, 也可以改变其他作战人员的私有信念或者团队的共同信念, 以此来达到作战目的一致, 使作战效能达到最大化。现有 CGF Agent 行为建模中很少涉及通信行为建模, 而已有通信模型主要存在三个方面的缺陷:

- 通过程程教条、刻板, 缺乏多样性、适应性与灵活性;
- 许多决策模型中的通信过程难以反映不同环境, 如地形、战场时机、冒险等因素对通信的影响;
- 未考虑已知通信行为限制条件或失败后的处理方案。

已有的通信模型在通信中较少涉及到环境的影响, 而在作战仿真中, CGF 间的通信是为了实现一致的联合意图, 周边战场环境对通信有很大影响, 更多的要求 CGF 主动性的进行通信, 这就产生了主体的通信行为。如何能够真实地反映 CGF 实体在虚拟战场环境中的通信行为, 是 CGF 研究中的重点问题之一。文献[50]首先分析了作战过程通信的流程, 对比传统协议驱动的通信机制, 提出了 CGF 主体的通信行为概念, 并给出了通信行为的内部结构, 如图 4 所示。其次, 根据具体的作战仿真领域对 CGF 通信语言要求的不同, 扩展了 KQML 通信原语, 建立了适用于分队作战的通信本体, 解决了概念不一致性、认知不一致性的问题, 提高了 CGF 交流和协作的效率, 同时也提高了 CGF 通信的可信性。最后, 基于 BDI 模型构建了 CGF Agent 的 OCBC 通信行为模型, 使 CGF Agent 通过对通信代价的分析自主选择通信行为, 从而能够表现出更加真实的战场行为。

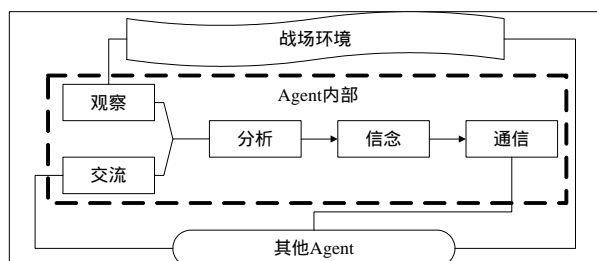


图 4 通信行为模块内部结构

4 结论

为适应未来作战仿真技术和应用的发展需求, 增强作战仿真系统可信度, 提高 CGF Agent 行为真实性, 人类行为表示技术的发展起着重要作用。协同行为建模作为人类行为表示中的重点和难点技术, 正越来越受到重视。为解决本文中提到的一些问题, 需要在研究协同行为建模的若干理论问题基础上, 重点突破关键实现技术, 进一步设计和开发通用的协同行为建模工具, 提高协同行为模型的开发效率。这是协同行为建模技术发展所面临的挑战, 也是必然的发展趋势。

参考文献:

- [1] 黄柯棣, 刘宝宏, 黄健, 等. 作战仿真技术综述[J]. 系统仿真学报 (S1004-731X), 2004, 16(9): 1887-1895. (HUANG Ke-di, LIU Bao-hong, HUANG Jian, et al. A Survey of Military Simulation Technologies (S1004-731X), 2004, 16(9): 1887-1895.)
- [2] 胡晓峰, 杨镜宇, 司光亚, 张明智. 战争复杂系统仿真分析与实验[M]. 北京: 国防大学出版社, 2008: 12-15.
- [3] 尹全军. 基于多 Agent 的计算机生成兵力建模与仿真[D]. 长沙: 国防科技大学研究生院, 2005.
- [4] 姜道洪, 刘会民. 作战协同概论[M]. 北京: 国防大学出版社, 2004, 04.
- [5] 郭齐胜, 杨立功, 杨瑞平. 计算机生成兵力导论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006, 10.
- [6] 陈中祥. 基于 BDI Agent 的 CGF 主体行为建模理论与技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
- [7] 张航义. 基于 Agent 的 CGF 行为建模技术研究[J]. 计算机仿真, 2003, 10(8): 3-19.
- [8] 王会霞. 计算机生成兵力系统研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2003: 3-17.
- [9] DoD 5000.59-P, Modeling and Simulation Master Plan [S]. October, 1995.
- [10] Cohen P R, Levesque H J. Intention is Choice with Commitment [J]. Artificial Intelligence (S0738-4602), 1990, 42(3): 213-361.
- [11] Cohen P R, Levesque H J. Teamwork [J]. Nous (S0029-4624), 1991, 25(4): 487-512.
- [12] Jennings N R. Joint Intentions as a model of Multi-Agent Cooperation [D]. UK: Dept. Electronic Engineering, Queen Mary and Westfield College, University of London, 1992.
- [13] Grosz B, Kraus S. Collaborative Plans for Group Activities [C]// Proc. of IJCAI-93. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1993: 367-373.
- [14] Grosz B, Kraus S. Collaborative Plans for complex group action [J]. Artificial Intelligence (S0738-4602), 1996, 86(2): 269-357.
- [15] Kinny D, Ljungberg M, Rao A, Sonenberg E, Tidhar G, Werner E. Planned Team Activity [C]// Proc. of Artificial Social Systems, Lecture notes in AI 830. New York, USA: Springer, 1994: 227-256.
- [16] Tambe M. Agent Architectures for Flexible, Practical Teamwork [C]// Proc. of the Fourteenth National Conference on Artificial Intelligence. Menlo Park, California, USA: AAAI Press, 1997: 22-28.

- [17] Tambe M. Tracking Dynamic Team Activity [C]// Proc. of ICMAS-97. Menlo Park, California, USA: AAAI Press, 1997: 80-87.
- [18] Tambe M. Towards Flexible Teamwork [J]. Journal of Artificial Intelligence Research (S1076-9757), 1997, 7(1): 83-124.
- [19] Jennings N R, Mamdani E H, Laresgoiti I, Perez J, Corera J. GRATE: A General Framework for Cooperative Problem Solving [J]. Journal of Intelligent Systems Engineering (S0963-9640), 1992, 1(2): 102-114.
- [20] Rich C, Sidner C. COLLAGEN: When agents collaborate with people [C]// Proc. of the International Conference on Autonomous Agents (Agents'97). New York, NY, USA: ACM, 1997:284-291.
- [21] Durfee E, Lesser V. Partial global planning: a coordination framework for hypothesis formation[J]. IEEE transactions on Systems, Man and Cybernetics (S0018-9472), 1991, 21(5): 1167-1183.
- [22] Decker K, Lesser V. Designing a Family of Coordination Algorithms [C]// Proc. of First International Conference on Multi-agent System, MA, USA: Publisher University of Massachusetts Amherst, 1994: 73-80.
- [23] Barbuceanu M, Fox M. The architecture of an agent building shell [M]// Wooldridge M, Muller J, Tambe M. (Eds.), Intelligent Agents, Volume II: Lecture Notes in Artificial Intelligence 1037. Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 1996.
- [24] 石纯一, 张伟. 基于 Agent 的计算[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007, 5.
- [25] 贾利民, 刘刚, 秦勇. 基于智能 Agent 的动态协作任务求解[M]. 北京: 科学出版社, 2007, 9.
- [26] 杨建池. Agent 建模理论在信息化联合作战仿真中的应用研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007, 10.
- [27] 宋一兵. 计算机生成兵力中智能体技术与应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.
- [28] 孙珠峰. 舰艇 CGF 协同反潜技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2003, 11.
- [29] 刘金琨, 王树青. 多智能体控制系统的设计与实现[J]. 控制理论与应用, 1999, 16(4): 580-582.
- [30] 邓海军, 尹全军, 胡记文, 查亚兵. 基于 MEBN 的战术意图识别[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(11): 2374-2379.
- [31] 胡记文, 尹全军, 冯磊, 邓海军, 查亚兵. 基于前景理论的 CGF Agent 决策建模研究[J]. 国防科技大学学报, 2010, 10(4): 131-136.
- [32] Lei Feng, Quan-Jun Yin, Ji-Wen Hu, Ya-Bing Zha. IBMSE: An Integrated Behavior Modeling and Simulation Environment [C]// Proc. of ICCMS2010. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2010, 01: 401-405.
- [33] Mintzberg H. The Structuring of Organizations [M]. Englewood Cliffs, USA: Prentice Hall, 1979.
- [34] Morgan G. Images of organizations [M]. Thousand Oaks, London, New Delhi: SAGE Publications, 1996.
- [35] Zambonelli F, Jennings N R, Wooldridge M. Developing multi-agent systems: the Gaia Methodology [J]. ACM Transactions on Software Engineering and Methodology (S1049-331X), 2003, 12(3): 317-370.
- [36] Hannoun M, Sichman J S, Boissier O, et al. Dependence relations between roles in a multi-agent system: Towards the detection of inconsistencies in organization [J]. Lecture Notes in Computer Science (S0302-9743), 1998, 3(2): 169-182.
- [37] Ferber J, Gutknecht O, Michel F. From agents to organizations: An organizational view of multi-agent systems [J]. Lecture Notes in Computer Science (S0302-9743), 2003, 14(5): 214-230.
- [38] Dastani M, Hulstijn J, Dignum F, et al. Issues in multi-agent system development [C]// Proc. of the third International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems. Washington, USA: IEEE Press, 2004: 922-929.
- [39] 冯磊, 尹全军, 胡记文, 查亚兵. 任务型 CGF 组织本体建模[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(11): 2389-2393.
- [40] Lei Feng, Quan-Jun Yin, Ji-Wen Hu, Ya-Bing Zha. The Formation of Task-Oriented Computer Generated Force Organization Based on Complex Networks [C]// Proc. of CISE09. Washington, USA: IEEE Press, 2009, 12: 1-4.
- [41] LK Soh, C Tsatsoulis. Allocation Algorithms in Dynamic Negotiation-Based Coalition Formation [C]// Proc. of the First International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems Workshop on Teamwork and Coalition Formation, 2002. Bologna, Italy: IEEE, 2002: 15-19.
- [42] Lei Feng, Ya-Bing Zha, Ji-Wen Hu, Quan-Jun Yin. Dynamic Task Decomposition and Allocation in CGF [C]// Proc. of ICCSIT2010. Chengdu, China: IEEE, 2010, 07: 624-628.
- [43] Chu-Carroll J, Carberry S. Conflict detection and resolution in collaborative planning [C]// Proc. of LNAI 1037. Montréal, Canada: IEEE, 1996: 111-126.
- [44] Rahwan I, Amgoud L. An Argumentation-Based Approach for Practical Reasoning [C]// Proc. ArgMAS 2006, LNAI 4766. Hakodate, Japan: Springer Berlin Heidelberg, 2007: 74-90.
- [45] Parsons S, Jennings N R. Negotiation through argumentation-a preliminary report [C]// Proc. ICMAS. USA: AAAI, 1996: 267-274.
- [46] Freeman K, Farley A. Towards formalizing dialectical argumentation [C]// Proc. of 15th Conference on Cognitive Science Society., OR, USA: University of Oregon Eugene, 1993: 440-445.
- [47] 姜丽, 刘大有, 白岩, 等. 多 Agent 协商研究[J]. 计算机研究与发展, 2006, 43(1): 1-5.
- [48] Tambe M, Jung H. The benefits of arguing in a team [J]. AI Magazine (S0738-4602), 1999, 20(4): 25-35.
- [49] Tambe M. Agent Architectures for Flexible [C] //Proc. of the 14th National Conf. on AI, USA: AAAI press, 1997: 22-28.
- [50] 李明峰. CGF 通信行为建模研究[D]. 长沙: 国防科技大学研究生院, 2010, 12.