

## 联合作战想定中基于描述任务逻辑的任务规划\*

张巍<sup>1+</sup>, 曾亮<sup>1</sup>, 张会<sup>2</sup>, 李思昆<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(国防科学技术大学 计算机学院, 湖南 长沙 410073)

<sup>2</sup>(海军潜艇学院 军事运筹教研室, 山东 青岛 266071)

### Task Planning Based on the Description Logic of Tasks in Joint Operation Scenarios

ZHANG Wei<sup>1+</sup>, ZENG Liang<sup>1</sup>, ZHANG Hui<sup>2</sup>, LI Si-Kun<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(School of Computer, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

<sup>2</sup>(Section of Military Operations, Naval Submarine College, Qingdao 266071, China)

+ Corresponding author: E-mail: wadezhang@nudt.edu.cn, http://www.nudt.edu.cn

Zhang W, Zeng L, Zhang H, Li SK. Task planning based on the description logic of tasks in joint operation scenarios. *Journal of Software*, 2010,21(Suppl.):140-148. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/10015.htm>

**Abstract:** Most existing researches on task planning in joint operation simulations are not based on a complete formal theory, thus can only support the description of low-level interactions among entities, but can not support the planning of multi-level organizational groups. The description logic of tasks is a theory for describing organization structures and collaborative behavior plans. This paper proposes a method named TPDLT (task planning based on the description logic of tasks), which provides a formal description of the task planning in joint operation simulations based on the description logic of tasks, and gives a definition of the completeness of task plans and a decidable theorem of the completeness under joint strategies. At last, a deduction algorithm for task planning is given. As illustrated by a case study, with the method TPDLT, the task interaction semantics in virtual groups can be described succinctly and accurately, and powerful service for the accomplishment deduce of tasks is provided.

**Key words:** joint operation; scenario; task planning; description logic of task; logic of task

**摘要:** 现有联合作战想定中的任务规划研究没有完整的形式化理论支撑,只能进行底层实体级别的交互,无法支持多层组织群体规划.描述任务逻辑是一种用于描述组织结构和协同行为规划的理论,基于描述任务逻辑理论提出了一种任务规划方法 TPDLT(task planning based on the description logic of tasks).该方法对联合作战想定中的任务规划及其可完成性进行了形式化建模,然后提出了联合策略下的规划可完成性的判定理论,最后给出了任务规划的推演算法.通过示例说明了 TPDLT 方法能够准确地描述虚拟群体组织指挥关系的任务交互语义,支持组织任务规划可完成性的可判定的推理验证.

**关键词:** 联合作战;想定;任务规划;描述任务逻辑;任务逻辑

联合作战想定中的任务规划是制定作战模拟想定的关键步骤,是作战方针和作战决心的具体体现,是用于

\* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60873120 (国家自然科学基金); the National Basic Research Program of China under Grant No.G2009CB723803 (国家重点基础研究发展计划(973))

Received 2010-05-01; Accepted 2010-11-09

审核作战计划和进行军事训练的重要方法,可以有效减少高技术条件下战争分析和训练的投入。

自从美军提出联合作战概念后,各国都在积极发展联合作战的想定编辑和规划制定工具.文献[1]考察了美国、加拿大等北约国家的 20 多个军事规划相关的系统,并将它们分为 4 个大类:部署和战争行动系统、空运资源分配和运输系统、航线与路径规划系统、其他专用军事规划系统.从公开的文献中得不到这些系统的技术细节.相对而言,国内研究起步较晚,目前有国防大学<sup>[2]</sup>、国防科学技术大学<sup>[3,4]</sup>、海军潜艇学院<sup>[5]</sup>等单位在进行军事行动规划的生成和建模等方面的探索研究,建立了一些军事模型,并开发了多个作战模拟系统,但总体上说应用于系统中的军事任务行动规划的算法及方法还比较零乱,不成体系。

一方面,国内外的研究多是基于作战实体级别的规划,对群体规划,尤其是多层组织群体规划的描述支持不够,不能有效地支持一体化联合作战模拟仿真的需求.另一方面,联合作战理论尚在发展之中,联合作战本身的复杂性导致了联合作战想定的复杂性,想定的编写工作量往往多达数十、数百万字以及大量图表<sup>[6]</sup>目前还没有一个完整的形式化理论体系来描述作战模拟想定中的任务规划.针对这些问题,本文尝试了对联合作战想定中多层组织的任务规划进行描述。

要描述联合作战想定中的任务规划,重点就是要对组织群体的高层任务交互进行描述.现有的可用于描述交互的理论主要有计算逻辑、进程代数、线性逻辑和任务逻辑.计算逻辑<sup>[7]</sup>是交互计算理论,进程代数<sup>[8]</sup>是关于通信并发系统的代数理论,两者都不太适合描述虚拟实体之间的资源交互.为了使线性逻辑成为真正的资源逻辑,Japaridze<sup>[9]</sup>和 Blass<sup>[10]</sup>将博弈语义引入线性逻辑系统中,然而,由于博弈语义不够自然,这种做法并没有得到广泛的重视,目前还没出现这类系统的公理化体系.Japaridze<sup>[7]</sup>和 Kungas<sup>[11]</sup>尝试了以线性逻辑为理论基础来研究交互关系的描述和针对交互关系的推理.但是线性逻辑是一种用于资源描述的计算逻辑,直接使用线性逻辑描述虚拟实体间的任务交互存在语义不够自然、推理过程比较麻烦和没有完备公理体系等问题.用描述任务逻辑<sup>[12]</sup>描述实体间的交互关系并进行有关推理则可以克服这些问题。

我们引入描述任务逻辑作为任务规划的理论基础.描述任务逻辑把 Agent 完成某项任务作为其他 Agent 的资源,是一种真正的资源逻辑,它除了具有任务逻辑<sup>[13,14]</sup>的能表述高层交互、具有完备可靠的公理化体系等特点,可以避免绝大多数规划逻辑所面临的“框架问题”和“知识前提问题”<sup>[15]</sup>外,同时还克服了任务逻辑是不可判定的这一缺陷<sup>[16]</sup>.文献[16]在对群体协同行为模型进行验证时初步提出了一些与任务规划有关的概念,但是想法不成熟,理论不够完整。

本文针对联合作战的特点,提出了基于描述任务逻辑的任务规划(task planning based on the description logic of tasks,简称 TPDLT)方法,该方法支持对多层组织群体规划的描述,具有较完整的形式化理论体系.TPDLT 方法采用描述任务逻辑理论对联合作战中的任务及规划进行了完整的形式化建模、给出了任务规划可完成性的定义、联合策略下的可完成性的判定理论、以及规划的推演算法.实验证明,TPDLT 方法能够准确地描述虚拟群体组织指挥关系的任务交互语义,能够描述不同规模不同分辨率的仿真中的任务规划,同时又能提供组织任务规划可完成性的可判定的推理验证服务。

本文主要创新如下:基于描述任务逻辑理论给出了任务和任务规划的完整形式化模型,并以此为基础提出了任务规划的可完成性判定理论,以及任务规划的推演算法。

本文第 1 节给出任务的形式化模型,并定义相应的逻辑系统.第 2 节给出任务规划的形式化模型.第 3 节基于该形式化模型提出任务规划的可完成性判定理论.第 4 节提出任务规划的推演算法.第 5 节通过实验对 TPDLT 方法进行说明。

## 1 任务模型

我们将所研究的虚拟世界领域即联合作战仿真环境记为  $\mathcal{W}$ ,用描述逻辑语言作为  $\mathcal{W}$  的本体描述语言.描述逻辑语言将知识分为两个部分:TBox 和 ABox.TBox 是包容断言的有限集合,它具有两方面的作用,一是用来引入概念的名称,二是声明概念间的包容关系.ABox 是实例断言的有限集合,用于指明个体的属性或者个体之间的关系.它有两种形式的断言,一是指明个体与概念间的属于关系,二是指明两个个体之间所具有的关系。

**定义 1.1(任务知识).** 设  $T$  为包容断言集,  $A$  为实例断言集, 二元对  $\langle T, A \rangle$  称为任务断言知识, 简称任务知识.

虚拟世界  $\mathcal{W}$  中最基本的概念是实体, 下面给出实体的定义.

**定义 1.2(虚拟实体).** 在虚拟世界中由计算机生成和控制的、具有独立遂行任务能力的对象称为虚拟实体, 简称实体. 多个实体组成的集合称为虚拟群体, 简称群体, 记为  $G$ . 群体的子集称为子群体.

**定义 1.3(任务公式).** 任务公式归纳定义如下:

- (1) 若  $A$  是  $n$  维原子任务名,  $t_1, t_2, \dots, t_n$  是项, 则  $A(t_1, t_2, \dots, t_n)$  是任务公式, 称为原子任务公式, 简称为原子公式;
- (2)  $\perp$  是任务公式 (用  $\perp$  表示经典逻辑中任一矛盾式);
- (3) 若  $\alpha, \beta$  是任务公式, 则  $\alpha \rightarrow \beta$  和  $\alpha \sqcap \beta$  都是任务公式;
- (4) 若  $\alpha$  是任务公式,  $C$  是概念,  $x$  是变量, 则  $\forall C(x). \alpha$  是任务公式;
- (5) 若  $\alpha$  是任务公式,  $C$  是概念,  $x$  是变量, 则  $\prod C(x). \alpha$  是任务公式.

任务公式也可以简称为任务或公式, 记为 Formula. “ $\rightarrow$ ”和“ $\prod$ ”统称为附加算子. 任务公式中所含附加算子的个数称为该公式的附加度. 附加度为 0 的公式称为原始公式. 若某公式的子公式不在附加算子的辖域中出现, 则称该子公式在公式中表面出现. 若  $\alpha$  附加度大于 0, 把  $\alpha$  中所有表面出现的附加公式代换为“ $(\perp \rightarrow \perp)$ ”所得到的公式称为  $\alpha$  的原始化公式, 记为  $\bar{\alpha}$ .

引入 acq 链来说明子公式在公式中表面出现的位置, 并称为子公式的出现说明, 其中  $a$  表示蕴含前件的位置,  $c$  表示蕴含后件的位置,  $q$  表示全称量化的位置, 空串记为  $\varepsilon$ . 对于给定的公式而言, 并非所有的出现说明都是有效的. 下面是有效出现说明的归纳定义.

**定义 1.4(出现说明的有效性).**

- (1)  $a\bar{r}$  对  $\alpha$  是有效的, 当且仅当  $\alpha = \beta \rightarrow \gamma$  且  $\bar{r}$  对  $\beta$  有效, 此时有  $a\bar{r}(\alpha) = \bar{r}(\beta)$ ;
- (2)  $c\bar{r}$  对  $\alpha$  是有效的, 当且仅当  $\alpha = \beta \rightarrow \gamma$  且  $\bar{r}$  对  $\beta$  有效, 此时有  $c\bar{r}(\alpha) = \bar{r}(\gamma)$ ;
- (3)  $q\bar{r}$  对  $\alpha$  是有效的, 当且仅当  $\alpha = \forall C(x). \beta$  且  $\bar{r}$  对  $\beta$  有效, 此时有  $q\bar{r}(\alpha) = \bar{r}(\beta)$ ;
- (4)  $\varepsilon$  对  $\alpha$  总是有效的, 且  $\varepsilon(\alpha) = \alpha$ .

含偶数个  $a$  的出现说明  $\Gamma$  称为正的, 否则称为负的.

**定义 1.5(基本行动和基本反应).**  $\Gamma$  是任务  $\alpha$  的一个有效出现说明,  $\Gamma/\gamma$  是  $\alpha$  的一个变换. 若  $\Gamma$  是正的 (正的) 且  $\Gamma/\gamma$  满足下列条件之一, 则称  $\Gamma/\gamma$  是  $\alpha$  的一个基本行动 (基本反应):

- (1)  $\Gamma(\alpha) = \beta_0 \sqcap \beta_1$  且  $\gamma = \beta_0$  或  $\gamma = \beta_1$ , 此时称  $\Gamma/\gamma$  是  $\alpha$  的一个基本  $\sqcap$ -行动 (反应);
- (2)  $\Gamma(\alpha) = \prod C(x). \beta$  且  $\gamma = \beta[x/c]$ , 其中  $c$  为使  $C(c)$  成立的常元, 则称  $\Gamma/\gamma$  是  $\alpha$  的一个基本  $\prod$ -行动 (反应).

**定义 1.6(行动和反应).** 设  $X = \langle E_1, \dots, E_n \rangle$ , 其中  $E_1$  是  $\alpha_0 = \alpha$  的基本行动,  $E_2$  是  $\alpha_1 = \alpha_0(E_1)$  的基本行动,  $\dots$ , 则称  $X$  为  $\alpha$  的行动. 若  $E_1, \dots, E_n$  均是基本反应, 则称  $X$  为  $\alpha$  的反应. 记行动的全体为  $\mathcal{A}$ .

我们用  $\alpha(X) = \alpha(\langle E_1, \dots, E_n \rangle)$  表示对  $\alpha$  进行变换后的结果, 即  $\alpha_n$ . 若  $X = \langle \rangle$ , 则  $\alpha(X) = \alpha$ ; 若  $X \neq \langle \rangle$ , 则称  $X$  为  $\alpha$  的真行动 (真反应). 由定义 1.1.5 容易得到下面的结论:

设  $X$  是  $\alpha$  的行动,  $Y$  是  $\alpha$  的反应, 则  $X$  也是  $\alpha(Y)$  的行动,  $Y$  也是  $\alpha(X)$  的反应, 且  $(\alpha(X))(Y) = (\alpha(Y))(X)$ , 记为  $\alpha(X, Y)$ . 进一步, 设  $\beta = \alpha(X, Y)$ , 称  $\beta$  为  $\alpha$  的一个进展. 若  $\beta \neq \alpha$ , 则称  $\beta$  为  $\alpha$  的一个真进展.

**定义 1.7(实现).** 设  $R = \langle \alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_m \rangle$  ( $m \geq 0$ ), 其中  $\forall i (0 \leq i < m)$ ,  $\alpha_{i+1}$  是  $\alpha_i$  的一个真进展, 则称  $R$  为  $\alpha$  的一个实现. 原始公式  $\alpha$  的唯一可能实现为  $\langle \alpha \rangle$ . 记实现的全体为  $\mathcal{R}$ .

**定义 1.8(行动策略).** 设  $f: \mathcal{R} \rightarrow \mathcal{A}$  是一个部分函数, 它对它已定义的每个实现赋予该实现的最后一个公式一个行动, 称  $f$  是一个行动策略, 简称策略. 当  $f$  对实现  $\mathcal{R}$  还未定义时, 记  $f(\mathcal{R}) = \langle \rangle$ .

**定义 1.9(策略下的实现).**  $f$  是一个行动策略,  $R = \langle \alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_m \rangle$  ( $m \geq 0$ ) 为  $\alpha_0$  的一个实现. 若  $f(R) = \langle \rangle$ , 且对  $\forall i (0 \leq i \leq m)$ , 当  $X = f(\langle \alpha_0, \dots, \alpha_i \rangle)$  时,  $\alpha_{i+1} = \alpha_i(X, Y)$ , 其中  $Y$  是  $\alpha_i$  的某个反应, 则称  $R$  为策略  $f$  下  $\alpha_0$  的一个实现, 简称  $\alpha_0$  的  $f$ -实现.

**定义 1.10(任务的断定可完成性).** 设  $\alpha$  为任务, 若存在策略  $f$ ,  $\alpha$  的任意实例在策略  $f$  下的任意实现, 在任务知识  $\langle T, A \rangle$  的任意解释  $I = \langle A^I, \cdot^I \rangle$  下都是成功的, 则称任务  $\alpha$  是基于任务知识  $\langle T, A \rangle$  断定可完成的, 简称为  $\alpha$

是可完成的,记为 $\vdash\alpha$ .

**定义 1.11(描述任务逻辑系统).** 任务知识 $\langle T,A \rangle$ 对应的描述任务逻辑系统 $L(T,A)$ 的公理为所有基于 $\langle T,A \rangle$ 断定可完成的原始任务. $L(T,A)$ 的推理规则有两条:

A-规则: $\frac{\pi}{\alpha}$ ,其中 $\pi$ 为 $\alpha$ 的基本行动;

R-规则: $\frac{\bar{\alpha},\pi_1,\pi_2,\dots,\pi_e}{\alpha}$ ,其中 $e \geq 1$ , $\pi_1,\pi_2,\dots,\pi_e$ 为 $\alpha$ 的所有基本反应.

如果任务公式序列 $\alpha_1,\alpha_2,\dots,\alpha_{n-1},\alpha_n$ 是一个证明,并且 $\alpha_n = \alpha$ ,则称该序列为任务公式 $\alpha$ 的一个证明;当 $\alpha$ 存在一个证明,则称 $\alpha$ 为定理,记为 $\vdash_{L(T,A)}\alpha$ ,简记为 $\vdash\alpha$ .

由描述任务逻辑理论<sup>[13]</sup>可得到以下一些有用的定理.

**定理 1.1.** 任务的断定可完成性是可判定的.

**定理 1.2.** 描述任务逻辑系统 $L(T,A)$ 是完备的和可靠的.

**定理 1.3.** MP 规则在描述任务逻辑系统 $L(T,A)$ 中是成立的.

## 2 任务规划模型

在虚拟世界中,实体行为一般是有明确意图和目的的、连续完整的独立过程,即任务.要使用描述任务逻辑对虚拟实体的协同行为进行建模,需将虚拟实体的目标抽象为任务,实体间的交互抽象为实体需要完成的任务和可以要求别人完成的任务(作为自身完成任务的资源),即为任务交互关系.

**定义 2.1(任务交互关系).** 设 $G$ 是一个群体, $a,b \in G,F$ 是任务公式, $G$ 上的一个任务交互关系就是一个三元组 $\langle a,b,F \rangle$ ,简称为交互.其中 $a$ 称为交互的发起者, $b$ 称为交互的参与者, $F$ 称为交互公式或交互任务.若 $F$ 为原始公式,则该任务交互关系称为原始交互.

特别地,若交互 $I = \langle a,b,F \rangle$ 中有 $a=b$ ,则称 $I$ 为自交互.自交互的集合记为 $S$ .

任务规划是能够达到一定目标的分层有序的任务序列,而这些任务对应于具体的交互.因此,任务规划可定义为任务交互的序列.

**定义 2.2(任务规划).** 若 $P$ 为群体 $G$ 上交互的集合, $<$ 和 $\Rightarrow$ 均是 $P$ 上的二元拟序关系,则称 $P$ 为群体 $G$ 上的一个任务规划,简称规划.其中, $<$ 称为定序约束, $\alpha < \beta$ 表示 $\alpha$ 在 $\beta$ 之前; $\Rightarrow$ 称为因果连接, $\alpha \Rightarrow \beta$ 表示 $\alpha$ 是 $\beta$ 的因果前提. $P$ 中所有交互公式的附加度之和称为 $P$ 的附加度.附加度为0的规划称为原始任务规划.

任务规划中的交互可以是本地的(自己产生、本地执行)、外部要求的或需要输出的(需要别人执行的).若对 $\forall x \in P$ ,有 $x \in S$ ,则称 $P$ 为个体规划,否则称 $P$ 为协同规划.在不引起混淆的情况下,也可以将规划简写为交互公式的集合.为了使规划能直观可见,我们定义了规划图来表示.规划图是一个无环有向图,它以交互为节点,以二元拟序关系为边.

**定义 2.3(规划的基本行动和基本反应).** 对于规划 $P$ ,若交互 $\langle a,b,F \rangle \in P$ ,则 $F$ 的一个基本行动(反应),也称为实体 $b$ 关于 $P$ 的一个基本行动(反应).类似任务公式,可以定义规划的行动、反应、进展.

为实现任务规划,每个实体可能采取不同的行动策略,并获得不同的实现效果,下面给出对应的形式定义.

**定义 2.4(实体的行动策略).** 实体 $b$ 关于规划 $P$ 的一个行动策略是一个部分函数,它为 $P$ 的每个实现的最后一个公式赋予一个行动.

**定义 2.5(策略下的实现).** 设 $f$ 是实体 $b$ 关于规划 $P$ 的一个行动策略, $f$ 下 $P$ 的一个实现 $R = \langle P_1,P_2,\dots,P_n \rangle$ 满足 $f(R) = \langle \rangle$ ,且对于每个 $i(1 \leq i \leq n)$ ,如果 $X = f(\langle P_1,P_2,\dots,P_i \rangle)$ ,则有 $P_{i+1} = P_i(X,Y)$ ,其中 $Y$ 是 $b$ 关于 $P_i$ 的某个反应.

规划 $P$ 经过若干个关于规划的基本反应和基本行动变换后,总可以变成原始任务规划.我们称所有可能得到的原始任务规划都是规划 $P$ 的最终实现,记为 $\bar{P}$ .易证若有 $\bar{P} \vdash T$ ,则 $P \vdash T$ ,此时称规划 $P$ 完成 $T$ .

在多分辨率建模仿真中,随着仿真分辨率的提高,规划中的交互任务需要更高分辨率的模型,即对交互任务的分解.

**定义 2.6(交互分解).** 设 $G$ 是一个群体, $I = \langle a,b,F \rangle$ 是 $G$ 上的一个交互,集合 $\{\langle a_i,b_i,F_i \rangle | i \leq n, \text{且 } n \text{ 为自然数}\}$ 称为

它的一个分解,当且仅当该集合是完成  $I$  的交互公式的一个规划,且  $b_i \in b$  或  $b_i \subset b.I$  的分解记为  $recipe(I)$ .

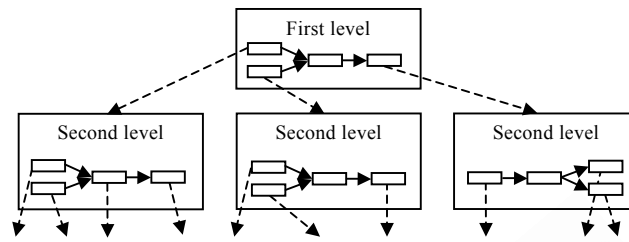


Fig.1 Multi-Layer task planning

图 1 多层任务规划示意图

通过对任务交互的逐层分解,可以实现多层次的任务规划.在多分辨率建模仿真中,这种层次任务规划可以自然地对应到不同分辨率的实体.图 1 所示是多层次任务规划的示意图,上层任务规划中的任务可以分解为下一层的任务规划,即为该任务的一个规划实现.

### 3 任务规划的可完成性判定理论

基于描述任务逻辑的任务规划是可判定的,下面首先给出相关形式定义:

**定义 3.1(交互的可完成性).** 称一个交互  $I=(a,b,F)$  是可完成的,是指  $b$  可以完成  $F$ ,或者  $I$  存在一个分解,且  $recipe(I)$  是可完成的,规划的可完成性见定义 3.3.

**定义 3.2(简单规划的可完成性).** 称一个简单规划对于某个实体  $b$  是可完成的,如果  $b$  可以完成其中执行者是  $b$  的交互任务.

**定义 3.3(规划的断定可完成性).** 若规划  $P$  的所有可能的最终实现都是实体  $b$  可完成的,则称这个规划是  $b$  断定可完成的.

**定义 3.4(规划是实体可实现的).** 称规划  $P$  是实体  $b$  可实现的,如果存在实体  $b$  的一个策略,使得该策略下  $P$  的每个实现的最后一个公式都是  $b$  断定可完成的.

**定义 3.5(联合策略).** 设  $a_1, a_2, \dots, a_m$  是规划  $P$  中所涉及的所有交互执行实体,  $f_1, f_2, \dots, f_m$  分别是  $a_1, a_2, \dots, a_m$  的策略,则  $f=f_1 \cup f_2 \dots \cup f_m$  就称为实体  $a_1, a_2, \dots, a_m$  的一个联合策略.联合策略是一个不确定函数.

**定义 3.6(联合策略下的实现).** 设  $f$  是  $a_1, a_2, \dots, a_m$  的一个联合策略,  $f$  下  $P$  的一个实现  $R=(P_1, P_2, \dots, P_n)$  满足对任意的  $i(1 \leq i \leq m)$ ,  $f_i(R)=()$ , 并且对于每个  $j(1 \leq j \leq n)$ , 有  $P_{j+1}=P_j(X)$ , 其中  $X$  满足对于某个  $i(1 \leq i \leq m)$ , 有  $X=f_i((P_1, P_2, \dots, P_j))$ .

若存在一个联合策略  $f$ , 使得  $P$  在该联合策略下的每个实现的最后一个公式对于任意一个  $a_i(1 \leq i \leq m)$  都是断定可完成的, 则称  $P$  是可完成的.

基于上述定义,可以得到如下定理:

**定理 3.1(联合策略定理).** 设  $a_1, a_2, \dots, a_n$  是规划  $P$  中所涉及的所有交互执行 Agent, 若  $P$  对于每个  $a_i$  都是可完成的. 设  $f_i$  为  $a_i$  的策略, 令  $f=f_1 \cup f_2 \dots \cup f_m$ , 则  $P$  在策略  $f$  下一定是可完成的.

证明: 设  $R=(P_1, P_2, \dots, P_n)$  是策略  $f$  下的任意一个实现, 根据定义可以看出, 对于任意  $i(1 \leq i \leq m)$ , 如果将  $R$  中不是由  $f_i$  中元素产生的进展去除掉, 得到的一定是在  $f_i$  下的一个实现, 所以它一定是  $a_i$  可实现的, 从而  $P$  在策略  $f$  下是可完成的. 证毕.  $\square$

联合策略定理说明了若规划  $P$  对每个涉及的智能体都是可完成的, 则一定存在一个联合策略  $f$ , 使得  $P$  在  $f$  下是可完成的.

#### 4 任务规划的推演算法

为了确保作战计划的可靠性,通常要基于作战预案进行任务推演,即是对任务规划进行推演,以便于发现预案中的薄弱环节,同时预测作战计划的效果,启发新的作战思想.联合作战想定中的任务规划不同于人工智能中的在线规划,是一种静态的规划方案.

对任务规划的推演过程,就是对多层次任务规划图的遍历.仿真过程中,遍历执行作战任务规划的基本方法是,从顶层任务开始,找到所有没有输入边的节点,判断交互任务的执行条件是否满足,如果满足则放入 *OPEN* 表,并执行,完成后删除该交互任务以及从它发出的所有的边.即:

1. 设置当前级别  $cur\_level=1$ ,生成初始值为空的 3 个列表 *OPEN1*,*OPEN2* 和 *CLOSED*;
2. 从  $cur\_level$  中选择所有无输入边,且父节点在 *OPEN2* 表中(或无父节点)的任务节点,即为集合  $\{\alpha \mid \alpha \in P, \neg \exists \beta((\beta \in P) \wedge ((\beta < \alpha) \vee (\beta \Rightarrow \alpha)))\}$ ,且  $(\alpha \in recipe(\beta)) \wedge ((\beta \in P) \rightarrow (\beta \in OPEN2))$ ,将这些节点放入 *OPEN1* 表中,并在图中删除这些节点,及从这些节点发出的边;
3. 若 *OPEN1* 表为空,令  $cur\_level=cur\_level-1$ ,若有  $cur\_level=0$ ,则规划图遍历完毕,算法结束,否则转步骤 2;
4. 将 *OPEN1* 表中所有无分解的节点移动到 *CLOSED* 中,并执行这些节点.若 *OPEN1* 非空,将 *OPEN1* 中所有元素移到 *OPEN2* 中,且令  $cur\_level=cur\_level+1$ ;
5. 转步骤 2.

算法具体描述如下(其中  $P[i]$ 表示规划第  $i$  层, $InEdge(n)$ , $OutEdge(n)$ 和  $Parent(n)$ 分别表示节点  $n$  的输入边、输出边和父节点):

算法 DTP(DEDUCE-OF-TASK-PLANNING).

**Input:**任务规划  $P$ .

**Output:**任务执行序列  $O=\langle F_1, F_2, \dots, F_n \rangle$ .

```

1   $cur\_level \leftarrow 1, OPEN1 \leftarrow NIL, OPEN2 \leftarrow NIL, CLOSED \leftarrow NIL,$ 
2  while not  $cur\_level=0$  do
3      for each  $n$  in  $P[cur\_level]$  do
4          if  $InEdge(n)=NIL$  and
5               $(Parent(n)=NIL$  or  $Parent(n)$  in  $OPEN2)$  then
6                  insert  $n$  into  $OPEN1$ , del  $n$ , del  $OutEdge(n)$ 
7          if  $OPEN1=NIL$  then
8               $cur\_level \leftarrow cur\_level-1$ 
9          else
10             for each  $n_2$  in  $OPEN1$  do
11                 if  $recipe(n_2)=NIL$  then
12                     insert  $n_2$  into  $CLOSED$ , del  $n_2$ ,
13             if not  $OPEN1=NIL$  then
14                 for each  $n_3$  in  $OPEN1$  do
15                     insert  $n_3$  into  $OPEN2$ , del  $n_3$ 
16                  $cur\_level \leftarrow cur\_level+1$ 
17   $O \leftarrow CLOSED$ 

```

任务规划的推演过程就是按照作战计划的步骤执行任务的过程,是对作战计划的演练,也是对描述任务逻辑的形式化推理的一个印证.

## 5 实例分析

### 5.1 基本想定

在联合战役中,作战的层次高,作战的宏观指导性强,作战计划通常按作战阶段,通过主战军种的协同计划来体现.例如一个大规模联合登陆作战,可分为先期作战阶段、集结上船阶段、海上航渡阶段、突击上陆阶段和建立登陆场阶段等,各个阶段又可以划分为更多更小的阶段.下面我们以联合登陆作战的红方突击上陆阶段作为基本想定进行实例分析.

例如,在一次大规模联合登陆作战中,红方以陆战旅和空降师为主,其他各战役集团协同,在联合指挥部的指挥下通过抢滩登陆和空降,实现上陆的目的,并进一步夺占战役目标城市  $D$ ,作战区域及部署如图 2 所示.登陆、空降完成后的战场情况如图 3 所示.



Fig.2 Initial deployment of combat

图 2 战场初始部署



Fig.3 Landing, airborne completed

图 3 登陆、空降完成

### 5.2 任务规划描述

作战计划在联合指挥部  $hq$  的指挥下组织实施,分为 3 个阶段:火力准备( $T_a$ )、登陆作战( $T_b$ )和岛上进攻( $T_c$ ).第 1 阶段,区域  $A$ ,舰艇编队  $s$  直前扫雷破障( $T_1$ ),区域  $E$ ,佯动部队  $f$  进行佯攻( $T_2$ );第 2 阶段,区域  $B$ ,舰炮火力支援( $T_3$ ),飞行编队  $p_1$  空中掩护( $T_4$ ),陆战旅  $m$  抢滩登陆( $T_5$ ),区域  $C$ ,飞行编队  $p_2$  空中掩护( $T_6$ ),空降师  $a$  实施空降( $T_7$ );第 3 阶段, $m$  和  $a$  分别从区域  $B$  和区域  $C$  向区域  $D$  突击( $T_8, T_9$ ).

联合指挥部  $hq$  的作战计划对应于描述任务逻辑系统中的协同规划,其形式化描述为:  $\{I_a, I_b, I_c \mid I_a \prec I_b \prec I_c\}$ , 其中  $I_a = \langle hq, \{s, f\}, T_a \rangle$ ,  $I_b = \langle hq, \{s, p_1, m, p_2, a\}, T_b \rangle$ ,  $I_c = \langle hq, \{m, a\}, T_c \rangle$ .

它们对应的分解如下:

$$recipe(I_a) = \{\langle hq, s, T_1 \rangle, \langle hq, f, T_2 \rangle\};$$

$$recipe(I_b) = \{\langle hq, s, T_3 \rangle, \langle hq, p_1, T_4 \rangle, \langle hq, m, T_5 \rangle, \langle hq, p_2, T_6 \rangle, \langle hq, a, T_7 \rangle \mid T_3 \Rightarrow T_5, T_4 \Rightarrow T_5, T_6 \Rightarrow T_7\};$$

$$recipe(I_c) = \{\langle hq, m, T_8 \rangle, \langle hq, a, T_9 \rangle\};$$

如果仿真需要,可以对任务  $T_i (i=1, 2, \dots, 9)$  进行进一步分解,以实现更多层次的规划.

这样,使用描述任务逻辑可以很容易很直观地描述联合战役的各个阶段各个部队的作战计划,并自然地支持多分辨率的建模.已有的方法要描述这种多层组织结构的多层任务规划则非常困难.例如 Kungas 使用一种类似 STRIPS 算子的规划算子  $\vdash \forall \underline{x}. (D \rightarrow A)$  来表示规划中的动作,这种算子无法自然表示行动的分支和分解.

### 5.3 任务规划推理

作战实体需要在作战计划的框架内执行行动任务,它既要知道联合计划,又要知道其在联合计划中需要完成的行动任务.

以第 2 阶段区域  $B$  的战斗为例,定义如下概念: $S(x)$  表示目标  $x$  可被舰炮压制,  $A(x)$  表示目标  $x$  可被空中压制,  $C(x)$  表示目标  $x$  可登陆,  $P_1(x)$  表示对目标  $x$  实施舰炮火力压制,  $P_2(x)$  表示对目标  $x$  实施空中火力压制,  $L(x)$  表示登陆  $x$ . 有  $T_3 = \prod S(x).P_1(x), T_4 = \prod A(x).P_2(x), T_5 = \prod C(x).(P_1(x) \cap P_2(x) \rightarrow L(x))$ . 则子规划  $\{\langle hq, s, T_3 \rangle, \langle hq, p_1, T_4 \rangle, \langle hq, m, T_5 \rangle\}$  的一个最终实现为  $\{\langle hq, s, P_1(B) \rangle, \langle hq, p_1, P_2(B) \rangle, \langle hq, m, P_1(B) \cap P_2(B) \rightarrow L(B) \rangle\}$ . 又有  $P_1(B), P_2(B), P_1(B) \cap P_2(B) \rightarrow L(B) \vdash$

$L(B)$ ,也就是该规划的最终实现可以实现目标  $L(B)$ .该实现的反应为 $\langle \varepsilon/P_1(x)[x/B], \varepsilon/P_2(x)[x/B], \varepsilon/(P_1(x) \wedge P_2(x) \rightarrow L(x))[x/B] \rangle$ ,意即  $hq$  要求  $s$  压制  $B$ ,要求  $p_1$  压制  $B$ ,要求  $m$  登陆  $B$ ,也就是实现目标  $L(B)$ 的要求.从而通过对规划的推理可以得出任务的可完成性,以及指挥者要求各个执行者完成的具体任务,反映了虚拟群体组织指挥关系的任务交互语义.

## 6 结束语

任务规划是联合作战想定建模中的关键步骤,对战法研究和军事训练具有重要意义.本文对联合作战想定中的任务规划采用描述任务逻辑进行了完整的形式化描述,实验证明此方法能够准确地描述虚拟群体的任务交互语义,适用于不同规模不同分辨率的仿真,同时还能提供组织任务规划可完成性的可判定的推理验证服务.

**致谢** 在此,我们向对本文的工作给予支持和建议的同行,尤其是国防科技大学计算机学院李思昆教授领导的研究小组的同学和老师表示感谢,同时感谢张英,徐华勋,徐婉莹对文章写作提出了宝贵修改意见.

## References:

- [1] Boukhtouta A, Bedrouni A, Berger J, Bouak F, Guitouni A. A survey of military planning systems. In: Proc. of the 9th Int'l Command and Control Research and Technology Symp. 2004.
- [2] Yin J, Si GY, Hu XF. Framework of scenario generation system for military strategic simulation. Journal of System Simulation, 2003,15(12):1672-1674 (in Chinese with English abstract).
- [3] Wang JS, Zeng L, Zhang H. Design and implementation of multi-layer plan for joint warfare tasks. Journal of Computer Research and Development, 2005,45(Suppl.):456-460 (in Chinese with English abstract).
- [4] Peng XH, Yang DS, Liu Z, Huang JC. Effect based action strategy of joint operation. Fire Control and Command Control, 2007, 32(5):12-15 (in Chinese with English abstract).
- [5] Xiao B, Sun YZ, Heng J. Research of formalization representation method for operation scenario. Journal of System Simulation, 2008,20(11):2978-2981 (in Chinese with English abstract).
- [6] Yang NZ. Wargame, War Game, Simulation. Beijing: PLA Publisher, 2007. 90-94 (in Chinese).
- [7] Japaridze G. Introduction to computability logic. Annals of Pure and Applied Logic (S0168-0072), 2003,123:1-99. [doi: 10.1016/S0168-0072(03)00023-X]
- [8] Baeten JCM, Weijland WP. Process Algebra. Amsterdam: Cambridge University Press, 1990. [doi: 10.2277/0521400430]
- [9] Japaridze G. A constructive game semantics for the language of linear logic. Annals of Pure and Applied Logic (S0168-0072), 1997,85(2):87-156. [doi: 10.1016/S0168-0072(97)00046-8]
- [10] Blass A. A game semantics for linear logic. Annals of Pure and Applied Logic (S0168-0072), 1992,56(1-3):182-220. [doi: 10.1016/0168-0072(92)90073-9]
- [11] Küngas P. Analysing AI planning problems in linear logic—A partial deduction approach. Advances in Artificial Intelligence—SBIA 2004 (S0302-9743), 2004,3171:252-270. [doi: 10.1007/978-3-540-28645-5\_6]
- [12] Zhang H, Li SK. The description logic of tasks: From theory to practice. Chinese Journal of Computers, 2006,29(3):488-494 (in Chinese with English abstract).
- [13] Japaridze G. The logic of tasks. Annals of Pure and Applied Logic, 2002,117:261-293. [doi: 10.1016/S0168-0072(01)00123-3]
- [14] Xu WY. The logic of tasks [MS. Thesis]. Xian: Shaanxi Normal University, 2004 (in Chinese with English abstract).
- [15] Russel S, Norving P. Artificial Intelligence: A Modern Approach. 2nd ed., Prentice Hall, 2003. 330-334.
- [16] Zhang H. Organizational coordinate behaviors modeling of virtual entity group [Ph.D. Thesis]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献:

- [2] 殷军,司光亚,胡晓峰.战略模拟想定生成系统框架.系统仿真学报,2003,15(12):1672-1674.
- [3] 王金树,曾亮,张会.多层次联合作战任务规划设计与实践.计算机研究与发展,2005,45(Suppl.):456-460.



- [4] 彭小宏,阳东升,刘忠,黄金才.基于效果的联合作战行动规划研究.火力与指挥控制,2007,32(5):12-15.
- [5] 肖滨,孙永忠,衡军.作战想定的形式化表述方法研究.系统仿真学报,2008,20(11):2978-2981
- [6] 杨南征.虚拟演兵:兵棋、作战模拟与仿真.北京:解放军出版社,2007.90-94.
- [12] 张会,李思昆.描述任务逻辑及其应用.计算机学报,2006,29(3):488-494.
- [14] 许文艳.任务逻辑[硕士学位论文].西安:陕西师范大学,2004.
- [16] 张会.虚拟群体组织协同行为建模方法研究[博士学位论文].长沙:国防科学技术大学,2006.



张巍(1982—),男,湖北公安人,博士生,主要研究领域为计算机兵力生成,虚拟现实.



曾亮(1970—),男,博士,副研究员,主要研究领域为计算机图形学,计算机仿真技术.



张会(1971—),女,博士,副教授,主要研究领域为计算机辅助决策,计算机仿真技术.



李思昆(1941—),男,教授,博士生导师,主要研究领域为虚拟现实,可视化.