

基于分层任务网络的多机器人复杂任务分解

Multi-robot complex task decomposition based on hierarchical task networks

钟 霄^{1*}, 孟祥宇², 尹作重¹, 王佃鹏³ZHONG Xiao^{1*}, MENG Xiang-yu², YIN Zuo-zhong¹, WANG Dian-peng³

(1.北京机械工业自动化研究所有限公司, 北京 100120;

2.中国机械科学研究总院集团有限公司, 北京 100044; 3.北京航空航天大学, 北京 100191)

摘 要:为解决多机器人复杂任务分解问题,提出了表征分解方案属性的三个指标,即关联系数,内聚度,任务粒度,并结合所提属性指标提出了距目标解的距离来衡量任务分解方案的效果。基于传统HTN方法,引入基于任务属性指标的调整方法以改善传统HTN方法分解结果的随机性以及无量化评价的缺点,并以玩具-零食生产过程为实例展示了任务分解的流程,通过与传统HTN方法比较寻解时间与指标质量验证了改进HTN方法的有效性。

关键词:任务分解; HTN方法; 关联系数; 内聚度; 任务粒度

中图分类号: TP391.7

文献标志码: A

文章编号: 1009-0134(2023)05-0192-05

0 引言

对比单机器人,多机器人协作在环境适应性、功能组合以及执行能力等方面的巨大优势^[1]正越来越激发着学界对多机器人系统领域的研究热情。而多机器人协作问题,则是多机器人系统领域持续了十多年的研究重点,虽然如此,目前对于多机器人协作问题的研究多集中于任务分配阶段,对于任务分解问题的相关研究却少之又少,但是任务分解作为任务分配的首要条件,其分解的任务网络是否合适会直接影响任务分配效果的优化与机器人资源的利用效率。一个合理的任务分解方案能够最大化的实现机器人间的高效协同和交互。

在多机器人领域的任务分解研究中,Stone和Veloso^[2]通过引入结构,在分解任务空间定义一组相关的角色和行为实现多Agent的协作。基于市场交易方法,Zlot和Stentz^[3]研究了将复杂任务分解为具有约束关系的子任务树的生成方法来解决任务分解问题。Botelho和Alami^[4]等人提出了一种基于MARTHA的分散形式的系统描述,通过生成任务计划并结合机器人相关环境因素,完成任务分解。刘倩和陈巍瑛^[5]等人提出了一种改进的粒子群算法,通过势场力模型的建立,给出了一种预分工与反馈调节的双层任务分解方法,实现了均衡的任务分解。

上述文献中所提出的方法从不同角度提出了多机器人复杂任务的分解方法,但大多是出于定性的分析方法,是对任务分解的流程建模,并没有对任务的相关关系等进行定量分析。基于此,本文参考作战任务分解^[6-9]以及制造任务分解^[10-13]等领域的相关文献,设计了一套衡量任务相关关系的指标以及基于分层任务网络的任务分解方法。

1 多机器人任务分解问题模型

1.1 任务表示方法

多机器人任务分解问题的目标是要将提交的复杂任务分解为多个具有尽可能高并行性的子任务^[14],对于任务的表达,将任务定义为一个五元组(ID, NA, CO, S, L),其中, ID为任务的唯一编码, NA为任务名称, CO为任务的约束条件, S表示任务的结构,包括任务可分解得到的子任务及子任务间的依赖关系, L表示任务的类型,可分为简单任务和复杂任务,其中简单任务为单个机器人即可完成的活动。

对于子任务间的依赖关系,主要包括时间依赖、资源依赖和其他依赖。其中,时间依赖不完全等同于时间上的先后关系,而是指代两个任务之间必须满足的特殊时间关系,比如某个任务必须紧跟着另一个任务执行,强调的是紧跟而非在其之后执行。资源依赖指某个任务需要依赖上一个任务的资源来进行执行,分为信息依赖和物资依赖。其他依赖则是指在某些情况下会产生的一些特殊要求。

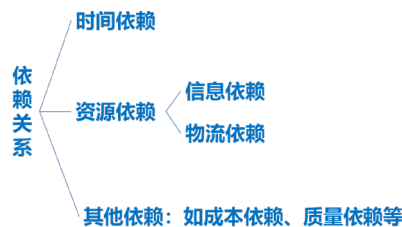


图1 依赖关系划分

每个任务间均可能同时会存在多种依赖关系,而在这些依赖关系中,资源依赖是多机器人复杂任务中最直接也是最基本的依赖关系,这种依赖通常也会使得两个子任务

收稿日期: 2022-03-27

作者简介: 钟霄(1998-),男,湖南常德人,硕士研究生,研究方向为机器人云平台。

间存在逻辑或时间上的先后顺序,也即时间依赖一般也都伴随着资源依赖。在绘制子任务结构图时, $a \rightarrow b$ 代表两个任务存在资源依赖,其他依赖关系不直接表示。

1.2 任务分解指标构建

在任务分解的过程中,需要遵照一定的规则对其进行控制,可分为以下几点:

1) 任务的划分应当具有层次性,由复杂到简单,先将一个任务分解成多个子任务,再将子任务分解为多个下层次子任务;

2) 划分出的各子任务要具有一定的独立性,尽量减少各任务之间协调、通信的工作;

3) 划分出的各子任务要具有一定的组合性,经过适当的组合可以让多个子任务共同完成一个较大的任务;

4) 任务的划分应当具有适配性,子任务的层次数量和规模应当尽量满足实际问题的需要。

为了满足以上规则,本文采用基于分层任务网络(HTN)的分解方法以满足规则1,并针对规则2,3,4分别采用关联性,内聚度以及任务粒度等指标来控制任务分解过程。

1.2.1 关联系数R

关联系数表征了各子任务间的相关关系,是子任务独立性的体现,为了表示任务分解方案整体的关联性,首先需要对两个任务间的相关关系进行研究,两个任务间的相关关系取决于前文所提到的依赖关系。

对于时间依赖,当一项任务的执行时间可完全由另外一项任务决定时,则称该两项任务为时间全相关,记其时间依赖 $TR=1$,若两项任务执行时间分别为 t_1 和 t_2 , t_2 在 t_1 规定的时间约束下有 h 时间的自由时间,则记两项任务间的时间约束

$$HS = \frac{t_1 + t_2}{t_1 + t_2 + h} \quad (1)$$

对于资源依赖,其物资依赖 MR 和信息依赖 IR 分别由专家打分制在 $[0, 1]$ 的范围内分五档进行评判。

对于其他依赖,参考具体要求进行考虑,具体数值 OR 同样由专家打分制进行评判。

记两项任务间的关联系数

$$T = \theta_1 TR + \theta_2 MR + \theta_3 IR + \theta_4 OR \quad (2)$$

其中 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ 根据用户设定的重要程度计算,重要程度为 $(0, 1)$ 之间的值,设定值越接近1代表其越重要,记其分别为 a, b, c, d 则:

$$\begin{cases} \theta_1 = \frac{a}{a+d+2} & \theta_2 = \frac{2b}{(a+d+2)(b+c)} \\ \theta_3 = \frac{2c}{(a+d+2)(b+c)} & \theta_4 = \frac{d}{a+d+2} \end{cases} \quad (3)$$

其中, $\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 = 1$, $\theta_2 + \theta_3 = 2/(a+d+2) > 0.5$,保证资源约束始终能够拥有一多半的权重,计算每两个任务间的关联系数构建如下信息关联矩阵,其中, t_{mn} 代表编号 m 的任务

和编号 n 的任务之间的关联系数, t_{nn} 代表自相关系数,取值为1。

$$T = \begin{bmatrix} t_{11} & \cdots & t_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{n1} & \cdots & t_{nn} \end{bmatrix}$$

对于这样一个拥有 n 个子任务的任务分解方案,定义其关联系数

$$R = \frac{T(\infty\text{-范数})-1}{n-1} \quad (4)$$

$T(\infty\text{-范数})$ 代表矩阵 T 的无穷范数,是矩阵 T 中所有行元素绝对值之和的最大值,则关联系数 R 表示了所有子任务中与其他子任务相关度最高的子任务与所有其他子任务相关度的平均值,能够反映任务分解方案整体的关联性,关联系数 R 越小越好。

1.2.2 内聚系数C

内聚度的含义为一个模块内部各成分彼此结合的紧密程度^[15]。在本文中,用该概念用来表示某个任务可分解得到的各子任务间的联系紧密程度,是子任务组合性的体现。若两个任务的任务关联系数大于一定阈值,则认为两个任务相关,阈值根据具体领域经验确定。

若任务 a 为某次任务分解的最小单元,则记其内聚系数 $C(a)=1$,而若某个任务 b 被分解为 n 个子任务,则对于该任务的每一个子任务,记其任务关联系数

$$f(i) = \begin{cases} \frac{\sum C(k)}{n-1} & n > 1 \\ 1 & n = 1 \end{cases} \quad (5)$$

其中, k 为这些子任务中所有与任务 i 具有联系的子任务,则对于任务 b ,其内聚系数

$$C(b) = \frac{\sum f(i)}{n} \quad (6)$$

对于元任务的内聚系数,采取上述公式进行逐层递归计算。

针对某个任务分解方案,子任务的下层子任务之间联系越紧密,子任务的内聚系数越大,元任务的内聚系数也就越大,因此,内聚系数越大越好。而内聚系数的增大同时也会导致关联系数的增大,这是两个存在一定冲突的指标。

1.2.3 任务粒度G

任务粒度是代表一个任务分解方案分解程度的指标,它既能反映任务的层次结构也能反映任务的规模和数量,其数值会直接影响任务执行的效率和质量,是子任务层次性和均衡性的体现。当任务粒度过大,任务分解不充分,任务内复杂度高,达不到任务分解的目的,将会影响执行的效率,任务粒度过小,任务分解层级过深,任务间的关系复杂,交互过多,势必影响子任务的独立性,同时也会增大资源交互的成本与管理成本。

任务粒度的衡量同时与任务层级 K 与子任务的数量 N 有关,且与二者成反比,同时,因为随着任务层数的增多,对比任务层数,任务的数量上升会呈现指数增长的趋势,

若直接定义为任务数量的倒数会使得层数不变的情况下任务粒度对于数量的变化不敏感, 所以将其定义为任务数量平方根的倒数, 同时为了使未分解状态的任务粒度为1需要添上合适的系数, 因此, 最终定义任务粒度为:

$$G = \frac{1}{2K} + \frac{1}{2\sqrt{N}} \quad (7)$$

当执行一次分解后, 任务粒度一定减小。

虽然此处提出了任务关联度, 任务粒度和内聚度三项指标的具体量化, 为了便于使用者的理解, 还需采用模糊控制的思想对其进行衡量, 对于一个任务分解方案, 任务关联度为越小越好, 内聚度越大越好, 对其用要求很高, 较高, 一般, 较低和很低五种描述来控制, 而对任务粒度, 希望其保持在一定的范围内, 则对其的描述可分为希望其数值很大, 较大, 一般, 较小和很小五种。具体的每种模糊描述对应的范围应当由具体使用的问题的领域知识确定。

2 HTN算法

2.1 传统HTN算法

HTN规划是基于分层抽象和领域知识的智能规划求解方法, 其基本步骤是: 采用递归的方法, 把复合任务目标进一步分解为更小粒度目标, 并在分解过程中实施相关控制和冲突校验, 直到建立具备严密时间联系和约束关系的复杂任务目标活动网络, 以此形成任务分解问题中的可行解。

传统的HTN算法一般将一个任务分解问题表示为四元组 $q = (s_0, w_0, 0s, Ms)$, s_0 代表问题的数学模型, w_0 是初始任务的网络状态, $0s$ 表示操作集合, 描述任务执行的过程, Ms 为分解方法集合, 表示将复杂任务分解为多个子任务的过程。直接用该算法解决多机器人复杂任务分解问题的运行流程为:

- 1) 从初始状态 w_0 开始, 选择一个可转换为简单任务的复合任务 e_i , 随机不重复的选取一个方法 $m_j \in Ms$ 对 e_i 进行分解;
- 2) 形成总任务网络 w_0^* 及子任务网络集 Ns^* ;
- 3) 分别计算任务关联系数、内聚系数和任务粒度, 若有任一指标不满足约束条件, 回到步骤1, 若均满足则转到步骤4;
- 4) 输出分解结果并结束算法。

虽然传统的HTN方法因为其按照功能分解与需求领域无关的特点可被用来进行多机器人复杂任务分解, 但其依旧存在许多问题: 首先是传统的HTN算法是每次随机选定一个方法进行分解, 在进行评价指标分析计算后, 若未达标则重新随机选择方法进行分解, 实质上是一个枚举的过程, 而枚举法最大缺点就是运算量大, 速度慢, 运算效率低。其次, 传统的HTN方法一旦找到一个符合要求的算法后就会结束算法, 对于具有多个分解方法的任务, 无法找到

最优解。因此, 本文通过引入调整方法来直接对接近可行解的近似解进行结构调整来替代枚举并通过调整方法对关联系数、内聚系数和任务粒度的优化以获得更优解。

2.2 改进的HTN算法

对比传统的HTN算法, 本文在保留其原有结构的基础上, 加入了调整方法集合 T , 将其表示为五元组 $(s_0, w_0, 0s, Ms, T)$, T 可表示为 (Y, Mt) , Mt 的形式与 Ms 类似, 均表达了任务由一种形式像另一种形式转变的过程, 但调整方法 Mt 不仅包含分解方法还可能包含合成等其他方法, 且 Ms 中的分解方法一定会使任务层数发生改变, 而 Mt 中的分解方法可能会发生在同一层之间, Y 为与 Mt 相对应的表达式, 可表示为 $Y=f(R, C, G)$, 代表在调用调整方法 Mt 后各评价指标会发生的大致改变。

Y 中各指标改变的方向为:

任务粒度 G : 分解操作导致 G 减小, 合成操作导致 G 增大;

内聚系数 C : 若分解和合成操作发生了任务层级的改变, 则分解操作导致 C 减小, 合成操作导致 C 增大, 若未发生层级的改变, 其变化取决于调整部分与同层其他子任务的联系;

关联系数 R : 进行合成操作时, 若合成的子任务间关联度较高, 则 R 减小, 反之则 R 增大, 进行分解操作时, 若分解得到的子任务关联度较低, 则 R 减小, 反之 R 增大。

由于调整操作仅发生在整个任务结构的局部, 其对任务分解方案总体指标改变的大小难以进行量化, 只能采取模糊的形式进行表达。

如图所示为改进HTN算法, 由于在三项指标中, 任务粒度是随着任务分解过程变化最直观的指标, 因此取任务粒度作为分解迭代的终止条件, 在任务粒度达标前仅调用 Ms 中的分解方法, 在任务粒度达标后计算相关度和内聚度和目标解的差距调用调整方法直到满足三项指标的约束。定义三项指标与目标解的距离如下, 其中, R_{max} 为允许的最大独立系数, C_{min} 为允许的最小内聚系数, G_{max} 与 G_{min} 分别为允许的任务粒度最大值与最小值, $\Delta G = G_{max} - G_{min}$ 。

$$Dis(R) = \frac{R_{max}-R}{R_{max}} \quad (8)$$

$$Dis(C) = \frac{C-C_{min}}{C_{min}} \quad (9)$$

$$Dis(G) = \begin{cases} \frac{\min\{G_{max}-G, G-G_{min}\}}{\Delta G} & G_{min} < G < G_{max} \\ \frac{G-G_{min}}{\Delta G} & G < G_{min} \\ \frac{G_{max}-G}{\Delta G} & G > G_{max} \end{cases} \quad (10)$$

如在某次分解后, 任务粒度 G 和内聚度 C 均达到要求, 但关联系数 R 过大, 则调用能够减小关联系数 R 的调整方法。

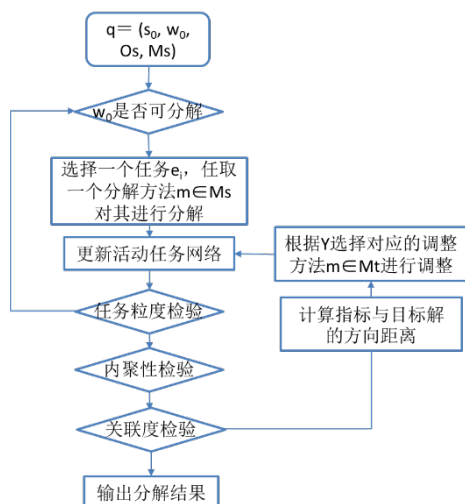


图2 改进HTN方法的简要流程图

3 实例分析

为了验证前文所提出的分解方法的合理性,采用某厂生产一批面向儿童的带玩具零食的生产任务作为实例,对前文提出的分解方法进行验证。用户对该问题各项指标的要求为:对任务相关度的要求较高,对内聚度的要求一般,希望任务粒度较小,则根据生产相关的领域知识和专家知识,确定相应的指标为 $R_{\max}=0.2$, $C_{\min}=0.3$, $0.29 \leq G \leq 0.34$ 。

使用传统HTN方法基于功能分解可对该生产任务进行分解如下，并为了后续方便计算给每个任务标上编号：

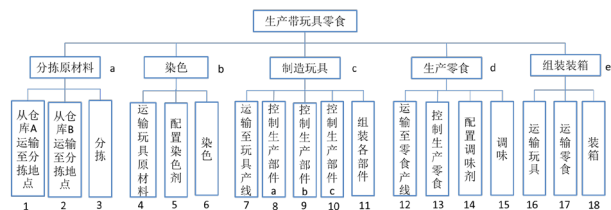


图3 零食-玩具生产任务功能分解示意图

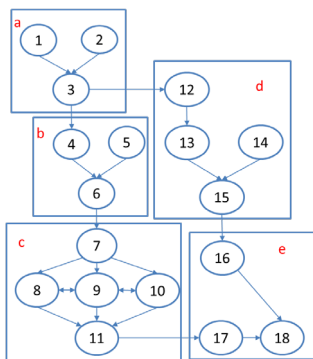


图4 零食-玩具生产任务功能分解结构示意图

根据任务结果进行R, C, G的计算。

1) 任务关联系数R

根据专业知识和专家经验, 列出18个子任务的信息关

联矩阵T如图5所示。

1	0.1	0.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.1	1	0.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.6	0.6	1	0.6	0	0	0	0	0	0	0	0.6	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0.6	1	0.4	0.7	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0.4	1	0.7	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0.7	0.7	1	0.6	0.2	0.2	0.2	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0.2	0.2	0.6	1	0.6	0.6	0.3	0	0	0	0	0	0	0.1	0	0
0	0	0	0.1	0.1	0.2	0.6	1	0.5	0.5	0.7	0.2	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0.1	0.1	0.2	0.6	0.5	1	0.5	0.7	0.2	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0.1	0.1	0.2	0.6	0.5	0.5	1	0.7	0.2	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.7	0.7	1	0	0	0	0	0	0	0.6	0.3	0
0	0	0.6	0	0	0	0.2	0.2	0.2	0	1	0.6	0.2	0.1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.6	1	0.4	0.7	0.3	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.4	1	0.7	0.3	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.7	0.7	1	0.6	0	0.3	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0.3	0.6	1	0.5	0.7	0	0
0	0	0	0	0	0	0.1	0	0	0	0.6	0	0	0	0.5	1	0.7	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0	0	0	0.3	0.7	0.7	0	0

图5 零食-玩具生产子任务信息关联矩阵

根据公式计算得到关联系数 $R=0.218$ 。

2) 内聚度C

以玩具部件制造为例，根据历史经验与专家知识，取相关阈值为0.3，运送原材料的任务与控制制造a, b, c组件的任务均相关，而因为其均为最底层的任务其内聚系数均为1，则关联系数计算如下：

$$f(7) = \frac{1+1+1}{5-1} = 0.75$$

而制造不同组件的任务与该子任务网络中的每个任务都有联系, 则:

$$f(8) = f(9) = f(10) = \frac{1 + 1 + 1 + 1}{5 - 1} = 1$$

则可得到玩具部件制造的内聚系数如下:

$$C(c) = \frac{1 + 1 + 1 + 0.75 + 0.75}{5} = 0.9$$

依次计算可分别得到5个二层子任务的内聚系数为:

$C(a)=0.67, C(b)=0.67, C(c)=0.9, C(d)=0.5, C(e)=0.67$,
依次计算其相关系数为 $f(a)=0.29, f(b)=0.39, f(c)=0.33$,
 $f(d)=0.33, f(e)=0.35$, 则元任务的内聚系数为:

$$C = \frac{f(a) + f(b) + f(c) + f(d) + f(e)}{5} = 0.34$$

3) 任务粒度

根据公式可直接计算元任务的任务粒度为:

$$G = \frac{1}{2 \times 3} + \frac{1}{2 \times \sqrt{18}} = 0.284$$

根据计算指标得出内聚度满足要求，任务关联度和任务粒度均不满足要求，传统HTN方法在此处判断任务关联度和任务粒度不满足约束条件后会重新选定一个方法进行分解并重复上述过程直到所有指标均满足约束条件。经过数次重复分解后，选择了一个未将任务c进行分解的方法，其各项指标为 $R=0.2$ ， $C=0.35$ ， $G=0.305$ 。

在本文提出的改进的HTN方法中,将对各指标与约束条件的距离进行详细的计算:

$$Dis(C) = \frac{C - C_{min}}{C_{min}} = \frac{0.34 - 0.3}{0.3} = 0.13$$

$$Dis(R) = \frac{R_{max} - R}{R_{max}} = \frac{0.2 - 0.218}{0.2} = -0.09$$

$$Dis(G) = \frac{G - G_{min}}{\Delta G} = \frac{0.284 - 0.29}{0.05} = -0.12$$

由于Dis(C)的绝对值较大,代表内聚系数距离约束条件还具有一定的余裕,因此可以调用牺牲一定内聚系数以增大任务粒度与减小任务相关系数的方法,选择调用将任务关联度较高的8,9,10合成为一个控制玩具部件生产的任务。

计算调用调整方法后的各指标有相关度R=0.171,C=0.316,G=0.295,各项指标均满足要求。

将传统HTN方法与改进的HTN方法的结果使用距离公式计算各指标与目标解的距离如表1所示。

表1 改进HTN与传统HTN指标对比

	Dis(C)	Dis(R)	Dis(G)	均值	方差
传统HTN方法	0	0.17	0.3	0.16	0.023
改进HTN方法	0.15	0.05	0.1	0.1	0.0025

在指标达到要求后,由上述公式计算出的各指标与目标解的距离实质上可以作为评判各指标优劣的依据,而对比传统HTN方法,虽然改进HTN方法的指标距离均值上略低,但是其方差要明显小于传统HTN方法,各项指标都与约束条件有一定的距离,没有极端情况,数据结构更优,效果更好。

对比传统的HTN方法,由于改进的HTN方法是在接近可行解的过程中进行调整方法的调用,极大的增加了寻找到可行解的概率,规避了进行重新分解的过程,提高了寻找任务分解方案的速度和效率。同时,由于是有目的性的朝着可行解的方向分解,比起传统HTN随机寻找可行解找到即停止的方法,其综合效果更好。

4 结语

针对多机器人任务分解问题,本文基于任务分解原则,提出了任务关联度,内聚度以及任务粒度等指标的相关表达形式,并提出了一种基于调整方法的改进HTN方法,能够在接近可行解而不满足指标要求时修改子任务网络而非重新分解,最后以具体实例展示任务分解流程并与传统HTN方法对比验证其可行性。

任务分解方案本质上是任务分配的前置,其目的是为了任务分配效率更高,然而,目前提出的任务分解方案

与任务分配依旧是弱耦合关系,虽然满足的各项指标是为了使任务分配效果更优,但并未直接将其相结合,即以任务分配的效果对任务分解进行指导,在后续的研究中将考虑环境也即机器人资源的响应对任务分解的影响。

参考文献:

- [1] 张维冬.云机器人平台下面向服务质量的调度策略研究[D].济南:山东大学,2017.
- [2] Nardi D, Noda I, Ribeiro F, et al. Robocup soccer leagues[J].AI Magazine,2014,35(3):77-85.
- [3] Alighanbari M, Kuwata Y, How J P. Coordination and control of multiple UAVs with timing constraints and loitering[C]//American Control Conference,2003. Proceedings of the 2003. IEEE,2003,6:5311-5316.
- [4] Parker L. E. ALLIANCE: An Architecture for Fault Tolerant Multirobot Cooperation[J].IEEE Transactions on Robotics and Automation,1998,14(2):220-240.
- [5] 刘倩,陈璇瑛,冯艳红.群机器人任务分工与协同搜索方法[J].计算机工程与设计,2020,041(5):1458-1463.
- [6] 程恺,车军辉,张宏军,等.作战任务的形式化描述及其过程表示方法[J].指挥控制与仿真,2012,34(1):15-19.
- [7] 王伟,刘付显.基于协同相关度的作战任务分解优化[J].火力与指挥控制,2017,42(11):107-110.
- [8] N. Junfeng, "Operational Task Decomposition Method based on Extended HTN Planning," 2021 8th International Conference on Dependable Systems and Their Applications (DSA), Yinchuan, China,2021,626-630.
- [9] 董涛,刘付显,李响.内聚度和粒度在作战任务分解评估中的应用[J].电光与控制,2012,19(12):14-17.
- [10] 冯子扬,胡晓兵,霍云亮,等.网络协同设计过程的任务分解算法模型研究[J].起重运输机械,2021,No.578(6):18-24.
- [11] 庞辉,方宗德.网络化协作任务分解策略与粒度设计[J].计算机集成制造系统,2008,119(3):425-430. DOI:10.13196/j.cims.2008.03.11.pangh.003.
- [12] 刘明周,王强,凌琳.基于分层任务网络的云制造任务分解方法[J].中国机械工程,2017,28(8):924-930.
- [13] Z. Fang, Q. Wu and D. Guan, "Towards optimal resources allocation in cloud manufacturing: new task decomposition strategy and service composition model," 2021 IEEE 21st International Conference on Software Quality, Reliability and Security Companion (QRS-C), Hainan, China,2021,289-297.
- [14] 李玉,党德玉.一种改进的基于多Agent协作的任务分解算法[J].东北电力大学学报(自然科学版),2008,82(4):48-51.
- [15] 包北方,杨育,李斐,等.产品定制协同开发任务分解模型[J].计算机集成制造系统,2014,20(7):1537-1545. DOI:10.13196/j.cims.2014.07.baobeifang.1537.9.2014073.



【上接第186页】

- [9] 陶飞,张萌,程江峰,等.数字孪生车间——一种未来车间运行新模式[J].计算机集成制造系统,2017,23(1):1-9.
- [10] 王诗昆.数字孪生在市政建设项目中的场景应用[J].建筑施工,2022,44(12):3002-3005.
- [11] 刘斌,蒋涛,吉庆伟,等.数字孪生技术与智慧水利系统的融合及应用[J].江苏水利,2022(S2):41-44.
- [12] 朱敏,施闻亮.数字孪生技术在水利工程中的实践与应用[J].

江苏水利,2022(S2):81-85.

- [13] 曹原,代进雷,刘佳.混合现实(MR)技术开辟培训“元宇宙”[J].中国电力教育,2022(9):30-31.
- [14] 钱朝宁,王建表,陈明亮,等.数字化离散制造解读及对策研究[J].企业改革与管理,2021(23):9-16.
- [15] 魏莉岩,王书,刘猛,等.区域化站场无人化智慧巡检的探索与创新[J].新型工业化,2021,11(6):251-252.