

合同网协议协商机制收敛性与收敛速率分析

刘刚^a, 王瑛^a, 张发^a, 郭戎潇^b

(空军工程大学 a. 装备管理与安全工程学院, b. 信息与导航学院, 西安 710051)

摘要: 针对合同网协议协商机制缺乏问题求解质量与效率分析的情况, 设定假设条件, 构建马尔可夫链模型, 得出了利用目前已有的合同类型无法保证全局收敛的结论. 在此基础上, 提出了变邻域合同系的概念, 通过分析控制方式对收敛性的影响, 得出了集中式控制可以保证全局收敛以及分布式控制以概率保证全局收敛的结论, 并设计了概率的计算方法. 采用 Doebin 理论, 对应用变邻域合同系的收敛速率进行分析, 得出了集中式控制收敛速率与分布式控制收敛速率的上下界估计.

关键词: 合同网协议; 马尔可夫链; Doebin 理论; 收敛性; 收敛速率

中图分类号: TP18

文献标志码: A

Convergence and convergent rate analysis of contract net protocol negotiation mechanism

LIU Gang^a, WANG Ying^a, ZHANG Fa^a, GUO Rong-xiao^b

(a. Equipment Management & Safety Engineering College, b. Information & Aviation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China. Correspondent: LIU Gang, E-mail: lucky_evermail@sina.cn)

Abstract: Considering the deficiency of contract net protocol negotiation mechanism convergence and convergent rate research, the Markov chain model of contract net protocol is created under the assumption setting, and it is proven that using previous contract types cannot be guaranteed to get global convergence. Using this as a foundation, the concept of variable neighborhood contract family is proposed. By analyzing the influence of controlling to convergence, the conclusion is obtained that centralized control can guarantee the global convergence and distributed control can guarantee the global convergence with probability, and the calculation method of probability is presented. By taking the advantage of Doebin theory, the convergent rate of variable neighborhood contract family application is analyzed, and the estimates of the convergent rate under centralized control and the upper and lower bounds of convergent rate under distributed control are presented.

Key words: contract net protocol; Markov chain; Doebin theory; convergence; convergent rate

0 引言

随着分布式计算在现代社会生活中的应用日趋广泛, 自动协商机制的作用也日益明显. 作为分布式计算的核心, 自动协商的实质是基于协作主体的能力与资源、任务执行条件等约束关系, 对任务进行分配与再分配的过程. 合同网协议作为一种典型的协商机制, 以其建模简洁实用, 能够模拟各种利益关系等特点, 赢得了人们的青睐, 具有广泛的应用前景.

合同网协议是 Smith^[1]于 1980 年在研究分布式问题求解过程中借鉴拍卖机制提出的, 其基本思想是将任务的委派与迁移通过 Agent 之间的招标-投

标-中标的市场机制进行实现, 目的是使 Multi-agent system 以较低的成本和较高的质量完成任务. 此后, Sandholm^[2]完成了合同网协议的形式化描述并扩展了合同类型, 通过仿真实验分析了合同类型与使用次序对个体理性路径、收敛性与收敛速率的影响^[3-4]. 龙涛等^[5-6]在无人机分布式任务分配研究中借鉴 Sandholm 的思想, 设计了任务分配步骤并修正了合同类型, 实现了 Sandholm 理论成果向实践的转化.

Sandholm 和龙涛等的工作为利用合同网协议进行任务分配构建了基础理论框架. 此后的研究主要是结合应用背景, 出于提高协商质量与提升协商效

收稿日期: 2013-05-03; 修回日期: 2013-10-01.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71171199).

作者简介: 刘刚(1985-), 男, 博士生, 从事任务规划与优化算法的研究; 王瑛(1967-), 女, 教授, 博士生导师, 从事任务规划与优化算法等研究.

率的目的,围绕招标策略^[7-8]、协议机制^[9-10]、合同类型^[11-12]、控制方式^[13-14]等方面,对合同网协议的收敛性与收敛速率进行了一定程度的探索.

目前,对于合同网协议收敛性与收敛速率的研究,尽管在提升收敛效率方面取得了一定的成果,也已经认识到影响收敛质量的关键因素,但是,由于采用的是仿真实验与数量统计方法,而没有从数学解析的视角进行分析,无法形成揭示客观规律的共性准则.面对纷繁复杂的合同网协议拓展研究, Sandholm 指出,对传统合同网协议的改进和扩展工作都存在一定的局限性,需要根据具体应用环境设定合适的协议内容、类型和机制.

本文以马尔可夫链为分析工具,通过构造任务分配状态空间与建立状态转移随机矩阵的方式,分别对合同网协议的收敛性和收敛速率进行分析,从数学解析的视角为协商机制的完善提供依据.

1 合同网协议协商机制收敛性分析

全局收敛性是求解质量的保证,合同网协议协商机制收敛性研究的现状,源于控制逻辑分析能力以及系统动态行为预见能力研究的缺乏.

1.1 任务分配问题的状态空间

作为典型的最优化问题,任务分配问题的形式化表述与状态空间的构建都与问题求解算法密切相关.合同网协议协商机制没有涉及群体智能的内容,与 TA、SA 等迭代智能算法类似,问题求解的可行域构成了状态空间的规模.

为应用合同网协议进行求解,需要对任务分配问题的状态进行编码,为此,可以分别建立协作主体集合 Agent : {agent_{*i*}} 与任务集合 Task : {task_{*j*}}. 考虑 agent_{*i*} 的任务分配情况,可以建立长度为 #Task 的二进制代码表示 agent_{*i*} 的任务分配, # 表示集合中元素的个数.若 task_{*j*} 分配至 agent_{*i*}, 则对应 *j* 位置的代码为 1, 否则取 0. 将此推广到 Agent 集合,则可以生成 #Agent × #Task 的二进制代码矩阵,用以表示状态空间的一种状态.注意到,同一任务不可能同时分配至多个协作主体,规模为 #Agent × #Task 的二进制代码矩阵可以表示 #Agent^{#Task} 种情况,由此也构成了任务分配问题的状态空间 *I*, 设 #*I* = #Agent^{#Task}.

将适应度函数 *f* 引入状态空间,可以对构成状态空间的状态进行排序与分类.为便于描述且不失一般性,假设存在单一最优点,以序号表示状态且按照适应度从小到大的顺序构成状态序列 *I* = {*i*₀, *i*₁, ..., *i*_{#*I*-1}}, 于是合同网协议求解任务分配问题的实质便转化为从任意状态 *i*_{*s*} 出发搜索状态 *i*₀ 的过程.

1.2 合同网协议状态转移随机矩阵

1.2.1 假设条件的设定

作为分布式环境下的问题求解方法,合同网协议只提供协作主体之间协商的协议框架,具体的任务分配策略需要根据应用背景进行设定.鉴于合同网协议扩展形式众多,为了简化分析且不失共性,本文以文献 [2-6] 的研究成果为基础,对扩展形式进行有针对性的取舍,假设如下.

1) 招标策略: 招标者采用广播方式发布任务,全体协作主体都可以参与投标,不考虑扩展形式对于招标范围的影响.

2) 协议机制: 允许协作主体在任务执行过程中对任务进行再分配,并进行多次协商以避免分配陷入局部最优.

3) 合同类型: 协作主体可以采用买卖合同、交换合同、聚类合同和多主体合同.鉴于计算复杂性的要求摒弃了融合合同,将条件合同纳入适应度函数的范畴而合理规避.

4) 控制方式: 多主体合同的采用使得分布式控制也具有集中式控制的能力,控制方式归结为集中式控制.

1.2.2 状态转移随机矩阵的构建

在模型假设的基础上,构建状态转移随机矩阵,还需要理解合同网协议的工作机理.合同网协议是以招标策略与合同类型决定搜索范围,以中标策略明确搜索方向的问题求解方法.其中,招标策略可以显著降低通信频率,中标策略基本是在招标策略已经有效缩减搜索范围的前提下进行解析计算而得出的.但是,本文所假设的广播式任务发布方式破坏了搜索范围有效缩减的前提条件,而采用解析计算的中标策略又无法同时满足时效性要求.考虑到本文所进行的收敛性分析主要是针对协商机制的探讨,并不涉及应用背景,为满足收敛性分析的共性原则,假设中标策略为随机遍历搜索方式,即通过合同类型所确定的搜索范围中的状态与当前状态之间都存在正概率直接连通.本文确立如下步骤建立状态转移随机矩阵:

1) 根据随机遍历搜索方式,对于任意状态 *i, j*, 设 $p_{ij} > 0$;

2) 根据状态序列,对于任意状态 *i, j*, 当 $i < j$ 时, 设 $p_{ij} = 0$, 并且 $\text{sequence}_i = \sum p_{ij}, i < j$;

3) 根据设定的合同类型,对于任意状态 *i, j*, 在 $i > j$ 范围内,综合运用多种合同验证是否可以将状态 *i, j* 直接连通,若无法直接连通,则设 $p_{ij} = 0$, 并且 $\text{vacant}_i = \sum p_{ij}, i \rightarrow j$;

4) 令 $p_{ii} = p_{ii} + \text{sequence}_i + \text{vacant}_i$.

观察状态转移随机矩阵的建立步骤可以发现, 关键在于步骤3) 中状态 i, j 直接连通性的验证. 为此, 需要进一步理解合同类型对于搜索范围的决定方式, 可以在任务的传播方向与传播数量两个层面进行分析.

在任务的传播方向层面, 买卖合同提供任务的单向传播能力, 交换合同提供任务的双向传播能力, 在集中式控制方式下, 多主体合同提供在任意协作主体间任务的多向传播能力. 在集中式控制方式下, 3种合同的运用使得传播方向可以覆盖全部状态空间. 于是问题转化为在任意主体间迁移的合同数量是否具有连通状态空间的能力. 然而, 聚类合同中任务的组合及其数量是由协作主体依据自身信息得出的, 存在与全局最优相矛盾的可能, 因此无法保证在任务的传播数量上对于全部状态空间的连通.

需要说明的是, 采用上述步骤建立的状态转移矩阵满足随机矩阵的定义, 但由于在问题求解过程中不可能掌握适应度函数在状态空间的分布情况以及状态之间的连通关系, 只能得出 $p_{ij} > 0$ 的结论, 而无法得到 $p_{ij} = 0$ 的数量与位置.

1.3 合同网协议收敛性分析

为便于分析的需要, 引入状态分布概率 μ_n , 构建长度为 $\#Agent \times \#Task$ 的向量, 满足 $(\mu_n)_i \geq 0$ 且 $\sum (\mu_n)_i = 1$, 用以表示在时刻状态空间的概率分布情况. 吸收态 i_0 对应的概率分布为 $\pi = (1, 0, \dots, 0)$, 于是收敛性分析转化为验证 $\lim P\{|\pi - \mu_n| = 0\} = \lim P\{|\pi - \mu_0 P^n| = 0\} = 1$ 是否成立.

按照本文确立的步骤建立合同网协议状态转移随机矩阵, 可以得到类似于 $P = \begin{bmatrix} E & O \\ H & T \end{bmatrix}$ 的分块矩阵. 其中: E 为 1×1 规模的单位矩阵块, 表示吸收态; H 为 $(\#I-1) \times 1$ 规模的矩阵块, 表示非吸收态向吸收态转移的概率; T 为 $(\#I-1) \times (\#I-1)$ 规模的矩阵块, 表示非吸收态之间的状态转移概率; O 为 $1 \times (\#I-1)$ 规模的矩阵块且 $o_{ij} = 0$. 鉴于步骤3) 关于 $p_{ij} \geq 0$ 的结论, 可以推导出 $h_{ij} \geq 0, t_{ij} \geq 0$. 由此, 对于任意的 i , $P\{p_{ii} = 1\} \geq 0 \Rightarrow P\{p_{ii}^n = 1\} \geq 0$, 意味着存在局部最优解的可能, 故 $\lim P\{|\pi - \mu_n|\} \leq 1$. 由此可得出结论: 采用目前存在的合同类型的合同网协议不能保证协商机制的全局收敛性.

2 变邻域合同网协议协商机制收敛性分析

导致合同网协议协商机制无法保证收敛的原因在于, 目前存在的合同类型是以应用背景或算法效率提升为出发点而提出的, 并没有考虑连通状态空间的问题.

对收敛性结论的进一步分析可以发现, 关键环节对于收敛性的影响机理也是不同的. 招标策略与合同

类型是通过限定投标者数量与任务转化数量来影响搜索范围, 任务的转换只限定于招标者与中标者之间, 而控制方式则关注于招标者是否具有在投标者之间进行任务转换的能力.

在集中式控制方式中, 招标者具有对系统绝对的控制权力, 可以在系统内任意协作主体间进行任务的转换. 在分布式控制方式中, 包括招标者在内的协作主体之间没有必然的权力义务关系, 任务转换只能在招标者与中标者之间进行. 以 $agent_i$ 为招标者, 控制方式对于任务转换的限制如图1所示.

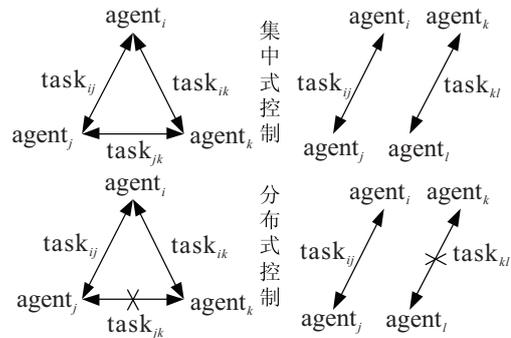


图1 控制方式对于任务转换的限制

因合同类型与招标策略对于收敛性的作用机理相似, 故由合同类型所导致的收敛性分析结论经过转化后同样适用于招标策略, 但是控制方式对于收敛性的影响还有待于证实. 为此, 本文引入变邻域搜索算法的相关思想^[15-16], 借鉴邻域结构的定义, 提出了变邻域合同系的概念, 探讨了控制方式对收敛性的影响.

2.1 变邻域合同系的提出

与现有的合同类型限定协作主体数量相区别, 变邻域合同是以协作主体之间任务转换数量为约束条件而不考虑参与协商协作主体数量的合同类型. 以任务转换数量为划分标准, 按照转换数量由小到大进行排序, 全体变邻域合同组成了变邻域合同系.

定义1 变邻域合同可描述为三元组 $\langle \text{change}, \langle \text{agent}_i, \text{agent}_j, \text{task}_{ij} \rangle, \text{benefit} \rangle$. 其中: change 表示任务转换数量; $\langle \text{agent}_i, \text{agent}_j, \text{task}_{ij} \rangle$ 表示任务在协作主体间的转换情况, 为 change 组三维向量, 每组向量中 agent_i 代表任务发送方, agent_j 代表任务接收方, task_{ij} 代表单一任务, 不同向量中的 $\text{agent}_i, \text{agent}_j$ 代表的协作主体可以不同; benefit 表示任务转换后系统效能的变化. 变邻域合同系可以描述为 change 从 $1 \sim \#Task$ 的全体变邻域合同组成的合同体系.

按照变邻域搜索算法的设计思想, 一种变邻域合同代表相应的邻域结构, 以变邻域合同系为工具的计算方法, 为寻找到最优的分配方式, 必须在全部邻域结构中进行搜索, 但是限于运算时间和消耗资源的制约, 存在求解质量与效率的矛盾. 为此, 仍然沿

用 1.2.1 节除控制方式以外的假设条件.

2.2 集中式控制方式收敛性分析

根据 1.2.2 节设定的步骤, 按照随机搜索方式建立状态转移随机矩阵. 在步骤 3) 中, 为计算 vacant_i 的值, 需要检验状态空间的直接连通性. 采用集中式控制方式使得招标者可以任意转换协作主体间的任务, 因此从任意状态 i_s 出发, 采用任务转换数量为 change 的变邻域合同连通的状态数量为 $C_{\#Task}^{\text{change}}(\#Agent - 1)^{\text{change}}$, 采用变邻域合同系连通的状态数量为 $\sum_{\text{change}=1}^{\#Task} C_{\#Task}^{\text{change}}(\#Agent - 1)^{\text{change}}$. 注意到状态 i_s 也表示一种状态, 因此, 状态 i_s 与采用变邻域合同系所能连通的状态数量为

$$\sum_{\text{change}=0}^{\#Task} C_{\#Task}^{\text{change}}(\#Agent - 1)^{\text{change}} = \#I.$$

可以看出, 采用集中式控制方式能够实现状态空间的全连通, 因此 $\text{vacant}_i = 0$, 所构建的状态转移随机矩阵为下三角元素均为 $p_c = 1/\#I$, 对角线元素 $p_{ii} = 1 - (i - 1)p_c$ 的矩阵形式.

对于任意的初始分布 μ_0 , $\lim_{n \rightarrow \infty} P\{|\pi - \mu_0| = 0\} = 1$. 由此可得出结论: 在集中式控制方式下, 采用变邻域合同系可以保证协商机制的收敛性, 即

$$P = \begin{bmatrix} 1 & & & & \\ p_c & 1 - (i - 1)p_c & & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & & \\ p_c & p_c & \cdots & 1 - (\#I - 1)p_c & \end{bmatrix} \Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} P = \begin{bmatrix} 1 & & & & \\ 1 & 0 & & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & & \\ 1 & 0 & \cdots & 0 & \end{bmatrix}.$$

2.3 分布式控制方式收敛性分析

招标者在系统中的地位与作用的差异, 使得分布式控制方式不具备在协作主体间任意转换任务的能力. 结合集中式控制方式变邻域合同连通状态数量的分析, 可以得出分布式控制方式实际上不能保证协商机制全局收敛性的结论. 但是, 分布式控制方式遵循任务转换仅在招标者与中标者之间进行的客观规律, 据此仍然可以得到协商机制收敛性的相关结论. 面对纷繁复杂的分配方案, 本文采用分配方案类型划分、类型包含方案数量计算、类型连通方案数量计算、状态连通数量计算、收敛概率计算的思路, 对分布式控制方式变邻域合同条件下的收敛性进行分析.

2.3.1 分配方案类型划分

对分配方案类型进行划分, 可以起到化繁为简的

作用以便于状态连通数量的统计.

1) 建立规模为 $\#Agent$ 的向量 sCl , 用以表示任务分配情况, sCl_i 元素的取值表示对应 agent_i 承载的任务数量, 令 $sCl_i = 0, i = 1, 2, \dots, \#Agent$.

2) 构建函数 $sCl = sCII(IA, IT, i)$, 其中 IA 表示待分配协作主体数, IT 表示待分配任务数, i 表示正在赋值的 agent_i . 函数 $sCII$ 运行机制的伪代码表述如表 1 所示.

表 1 函数 $sCII$ 运行机制的伪代码

function $sCII(IA, IT, i)$
for $tA = IT$ to $[IA/IT]; / [IA/IT]$ 为 IA/IT 的整数部分
$sCl_i = tA; /$ 变量 tA 表示 agent_i 的任务赋值数量
if $i < \#Agent$ / 说明任务分配未完成
$sCII(IA - 1, IT - tA, i + 1); /$ 计算 agent_{i+1} 的任务分配
end
end

3) 令 $sCl = sCII(\#Agent, \#Task, 1)$ 并进行计算.

2.3.2 类型包含方案数量计算

设分配方案类型的划分数量为 sA , 类型划分的结果为 sA 组 sCl 组成的矩阵. 为便于分析, 设 sCl_i 为序号 i 对应的分配方案类型, sCl_{ij} 为分配类型 i 中 agent_j 对应的任务分配数量, $i = 1, 2, \dots, sA, j = 1, 2, \dots, \#Agent$.

1) 建立规模为 sA 的向量 sCa , 用以表示对应分配类型包含状态的数量情况, sCa_i 元素的取值表示对应分配类型包含状态的数量, 令 $sCa_i = 0, i = 1, 2, \dots, sA$.

2) 构建函数 $sCa = sCaI(IA, IT, sCl)$. 其中: IA 表示待分配协作主体数, IT 表示待分配任务数, sCl 表示分配类型分类矩阵. 函数 $sCaI$ 运行机制的伪代码表述如表 2 所示.

表 2 函数 $sCaI$ 运行机制的伪代码

function $sCaI(IA, IT, sCl)$
for $i = 1$ to $sA; /$ 采用循环赋值方法, 依次对 sCa_i 进行计算
$sCa_i = cI(IA, IT, sCl_i, j) / I(sCl_i);$
end

3) 构建函数 $cI(IA, IT, sCl_i, j)$, 用以表示按照组合数计算的状态数量. 其中: IA 表示待分配协作主体数, IT 表示待分配任务数, sCl_i 表示序号为 i 的分配类型. 函数 cI 运行机制的伪代码表述如表 3 所示.

表 3 函数 cI 运行机制的伪代码

function $cI(IA, IT, sCl_i, j)$
$cb_{ij} = C_{IA}^1 \times C_{IT}^{sCl_{ij}};$
if $IA < \#Agent$ / 说明任务分配未完成
$cb = cb_{ij} \times cI(IA - 1, IT - sCl_{ij}, sCl_i, j + 1);$
else / 说明任务分配完成
$cb = cb_{ij}; /$ 迭代终止
end

4) 构造函数 $rI(sCl_i)$, 用以表示按照组合数计算的状态重复比例, 其中 sCl_i 表示序号为 i 的分配类型. 函数 rI 运行机制的伪代码表述如表4所示.

表4 函数 rI 运行机制的伪代码

function $rI(sCl_i)$
$dp_j =$ number of tasks equal to sCl_{ij} ; /相同次数只记录一次
$rt = \prod dp_j!$; /变量 rt 表示累计重复比例

5) 令 $sCa = sCaI(\#Agent, \#Task, sCl)$ 并进行计算.

2.3.3 类型连通方案数量计算

设分配方案类型的划分数量为 sA , 类型划分结果为 sA 组 sCl 组成的矩阵. 为便于分析, 设 sCl_{ij} 代表序号 i 对应的任务分配方案类型, sCl_{ij} 为分配类型 i 中 $agent_j$ 对应的任务分配数量, $i = 1, 2, \dots, sA, j = 1, 2, \dots, \#Agent$.

1) 建立规模为 $sA \times \#Task$ 的矩阵 cCa , 用以表示各分配类型在应用变邻域合同网协议类型系中对应的状态连通数量, 令 $cCa_{ij} = 0, i = 1, 2, \dots, sA, j = 1, 2, \dots, \#Agent$.

2) 构造函数 $cCa = cCaI(sCl)$, 其中 sCl 表示分配类型分类矩阵. 函数 $cCaI$ 运行机制的伪代码表述如表5所示.

表5 函数 $cCaI$ 运行机制的伪代码

function $cCaI(sCl)$
for $i = 1$ to sA /依次选取 sCl_i
for $j = 1$ to $\#Task$ /依次选取任务转换数量为 j 的合同
$cCa_{ij} = cI(sCl_i, j) - rI(sCl_i)/2$;
end
end

3) 构造函数 $cI(sCl_i, j)$, 用以表示按照组合数计算的状态连通数量. 其中: sCl_i 表示序号为 i 的分配类型, j 表示任务转换数量. 函数 cI 运行机制的伪代码表述如表6所示.

表6 函数 cI 运行机制的伪代码

function $cI(sCl_i, j)$
$cb_{ij} = 0$;
for $k = 1$ to $\#Agent$ /依次以 $agent_k$ 为招标者计算状态连通数量
if $sCl_{ik} \geq j$ /说明 $agent_k$ 只发送任务也能满足转换数量
$count = 0$; /变量 $count$ 表示 $agent_k$ 接收任务数量
while $sCl_{ik} \geq j - count \& \#Task - sCl_{ik} \geq count \& j \geq count$
$cb_{ij} + = C_{j-count}^{sCl_{ik}} \times (\#Agent - 1)^{j-count} \times C_{count}^{\#Task - sCl_{ik}}$;
$count + = 1$; /接收任务数量依次递增
end
else /说明 $agent_k$ 需要接收任务才能满足转换数量
$count = sCl_{ik}$; /变量 $count$ 表示 $agent_k$ 发送任务数量
while $count \geq 0 \& \#Task - sCl_{ik} \geq j - count \& j \geq count$
$cb_{ij} + = C_{count}^{sCl_{ik}} \times (\#Agent - 1)^{count} \times C_{j-count}^{\#Task - sCl_{ik}}$;
$count - = 1$; /发送任务数量依次递减
end
end
end

4) 构造函数 $rI(sCl_i)$, 用以表示按照组合数计算的状态重复数量, 其中 sCl_i 表示序号为 i 的分配类型. 函数 rI 运行机制的伪代码表述如表7所示.

表7 函数 rI 运行机制的伪代码

function $rI(sCl_i)$
$rt_{ij} = 0$;
for $k = 1$ to $\#Agent$ /建立招标者循环
for $l = 1$ to $\#Agent$ $l \neq k$ /建立投标者循环
if $sCl_{ik} + sCl_{il} \geq j$ /说明可能引起重复计数
if $sCl_{ik} \geq j$ /说明 $agent_k$ 只发送任务也能满足转换数量
$count = 0$; /变量 $count$ 表示 $agent_k, agent_l$ 接收任务数量
while $sCl_{ik} \geq j - count \& sCl_{il} \geq count \& j \geq count$
$rt_{ij} + = C_{sCl_{ik}}^{j-count} \times C_{sCl_{il}}^{count}$;
$count + = 1$; /接收任务数量依次递增
end
else /说明 $agent_k$ 需要接收任务才能满足转换数量
$count = sCl_{ik}$; /变量 $count$ 表示 $agent_k$ 发送任务数量
while $count \geq 0 \& sCl_{il} \geq j - count \& j \geq count$
$rt_{ij} + = C_{sCl_{ik}}^{count} \times C_{sCl_{il}}^{j-count}$;
$count - = 1$; /发送任务数量依次递减
end
end
end
end /投标者循环终止
end /招标者循环终止

2.3.4 状态连通数量计算

设分配方案类型矩阵 sCl 的规模为 $sA \times \#Agent$, 对应类型包含状态向量 sCa 的规模为 sA , 类型在变邻域合同系中连通状态数量矩阵 cCa 的规模为 $sA \times \#Agent$.

1) 建立规模为 sA 的向量 tC , 用以表示对应分配类型应用变邻域合同系连通状态的数量统计, 按照公式 $tC_i = \sum_{j=1}^{\#Task} sCa_i \times cCa_{ij}$ 进行计算.

2) 设分布式变邻域合同系状态连通数量和为 $tS = \sum_{t=1}^{\#sA} tC_i$, 数量统计完成.

2.3.5 收敛概率计算

通过 tS 的计算虽然无法获得状态分布的位置信息, 但是根据得到的状态连通的数量信息, 可以采用概率计算的方式对收敛性进行分析. 设 $p_s = tS / (\#I \times (\#I - 1))$, 表示状态空间内任意状态连通的概率, 即 $P\{p_{ij} = p_s\} = p_s, i \neq j$. 考虑到局部最优点在状态转移随机矩阵的表现形式为 $p_{ii} = 1, i \neq 1$, 即 $p_{ij} = 0, i > j$, 因此状态 i 不是局部最优点的概率为 $1 - (1 - p_s)^{i-1}, i \neq 1$, 分布式控制应用变邻域合同系可以收敛到全局最优点的概率为 $P = \prod_{i=2}^{\#I} 1 - (1 - p_s)^{i-1}$.

2.3.6 案例分析

为便于理解, 本文列举 $\#Agent = 3, \#Task = 3$ 时各步骤对应的计算结果, 如表8所示.

Doebelin收敛定理, 其收敛速率与集中式控制方式收敛速率相同, 即 $\|\mu_0 P^n - \pi\|_v \leq 2(1-\varepsilon)^n = 2(1-p_c)^n$.

事实上, 由于事先无法获取状态空间分布的具体信息, 最优收敛速率矩阵 P_h 作为一种状态转移随机矩阵类型, 并不具备指导实践的作用. 但是其与集中式控制方式收敛速率相同的结论却说明, 具有系统局部控制能力的分布式控制方式在收敛速率方面至多与具备全局控制能力的集中式控制方式相同. 最优收敛速率矩阵 P_h 收敛速率的结论符合实践经验, 构成了分布式控制收敛速率的上界.

最劣收敛速率矩阵 P_l 是表示适应度排序为 $i_{\#I-1}$ 的状态需要遍历全部状态空间才能连通吸收态 i_0 的矩阵类型. 显然 P_l 的概率分布不满足 Doebelin 条件, 为此本文采用 Doebelin 收敛定理推论进行收敛速率分析.

应用 Doebelin 收敛定理推论^[22], 需要分别计算 M 与 ε 的取值. 最劣收敛速率矩阵遵循对角线元素 $p_{11}^n = 1, p_{ii}^n = (1-p_c)^n, i > 1$, 且在 $i > j$ 范围内, 当 $j = 1$ 时, $p_{ij}^n = p_{ij}^{n-1}(1+p_c)$, 当 $j \neq 1$ 时, $p_{ij}^n = p_{ij}^{n-1}p_c$ 的运算规律. 结合 P_l 的矩阵形式, 可以得出在范围 $i > 1, j > 2$ 且 $i \geq j+1$ 内, $p_{ij}^n = p_{i+1,j+1}^n$ 的结论.

分析运算规律可以发现, 当 $n = \#I - 1$ 时, $p_{\#I,1}^n$ 首次转变为正值, $p_{\#I,1}^n = p_c^n$, 可得出 M 的分析结果. 在此基础上, 对 ε 的取值进行分析.

令 $k = 1, p_{11}^M = 1, p_{ii}^M = (1-p_c)^M, i > 1 \Rightarrow p_{11}^M > p_{ii}^M, i > k$.

令 $k = l \geq 2, \sum_{j=1}^l p_{ij}^M = \sum_{j=1}^{l+1} p_{i+1,j}^M = 1, p_{ij}^M = p_{i+1,j+1}^M \Rightarrow p_{i1}^M = p_{i+1,1}^M + p_{i+1,2}^M$ 且 $p_{i+1,2}^M > 0 \Rightarrow p_{i1}^M > p_{i+1,1}^M$.

综合以上分析可得出 $\inf_i p_{i1}^M = p_c^{\#I}$ 的结论. 令 $M = \#I - 1, \varepsilon = p_c^{\#I}$, 则最劣收敛速率矩阵 P_l 的收敛速率为

$$\|\mu_0 P^n - \pi\|_v \leq 2(1-\varepsilon)^{\lfloor n/M \rfloor} = 2(1-p_c^{\#I})^{\lfloor n/(\#I-1) \rfloor}.$$

最劣收敛速率矩阵 P_l 分析的实质是计算收敛步长为 1 且初值选择最劣解时的收敛情况, 构成了分布式控制收敛速率的下界.

4 结 论

合同网协议作为协商机制的典型代表, 以其简洁实用、能够成功模拟利益关系等特点, 正逐步发展成为解决任务分配问题的有效途径. 为理解合同网协议的工作原理, 本文在协商机制收敛性与收敛速率分析中进行了 3 个方面的探索:

1) 为分析收敛性与收敛速率, 在传统合同网协议

及其扩展理论分析的基础上, 通过在招标策略、协议机制、合同类型与控制方式等方面设定假设条件, 构建了合同网协议的马尔可夫链模型, 并借鉴相对成熟的群体智能算法收敛性分析方法, 得出了利用目前存在的合同类型无法保证全局收敛的结论.

2) 为检验控制方式对于收敛性的影响, 借鉴变邻域算法的设计思想, 提出了变邻域合同系的概念, 并分别在集中式控制方式与分布式控制方式中进行了验证. 由于无法事先获取状态空间的分布信息, 在对状态空间进行分类的基础上, 设计了分布式控制方式条件下状态连通数量的详细计算步骤与方法, 并得出了收敛概率的计算公式.

3) 采用 Doebelin 理论, 分别对集中式控制方式与分布式控制方式条件下, 应用变邻域合同系的协商机制收敛速率进行分析, 得到了相应控制方式收敛速率与收敛速率上下界的估计表述, 所得结论符合全局控制能力优于局部控制能力的实践经验.

应该清楚地看到, 合同网协议只是各协作主体之间进行协商的协作协议框架, 并没有根据问题具体情况设计任务分配优化策略. 为了拓展收敛性与收敛速率分析的适用范围, 本文对合同网协议的局部搜索方式采用随机搜索方式进行替代. 在此基础上, 为简化分析, 在处理任务之间的关联关系时, 只是将其纳入适应度函数的范畴进行规避而未作详细的讨论. 同时, 由于需要传送协作主体的私人信息, 本文设计的变邻域合同系对应的任务分配步骤, 是建立在合作型协作主体假设基础上的, 对于非合作型协作主体任务分配问题的收敛性与收敛速率的分析还有待于研究.

参考文献(References)

- [1] Smith R G. The contract net protocol: High level communication and control in a distributed problem solver[J]. IEEE Trans on Computers, 1980, 29(12): 357-366.
- [2] Sandholm T W. An implementation of the contract net protocol based on marginal cost calculations[C]. Proc of the National Conf on Artificial Intelligence. Washington DC: AAAI Press, 1993: 256-262.
- [3] Sandholm T W. Contract types for satisficing task allocation, I: Theoretical results[C]. Proc of the AAAI Spring Symposium. Washington DC: AAAI Press, 1998: 68-75.
- [4] Martin R Andersson, Tuomas W Sandholm. Contract types for satisficing task allocation, II: Experimental results[C]. Proc of the AAAI Spring Symposium. Washington DC: AAAI Press, 1998: 1-7.
- [5] 龙涛, 陈岩, 沈林成. 基于合同机制的多UCAV分布式协同任务控制[J]. 航空学报, 2007, 28(2): 352-358.

- (Long T, Chen Y, Shen L C. Distributed cooperative mission control based on contract mechanism for multiple unmanned combat aerial vehicles[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2007, 28(2): 352-358.)
- [6] 龙涛, 陈岩, 霍霄华, 等. 战场环境中多无人机动态任务调度[J]. *计算机工程*, 2007, 33(10): 36-38.
(Long T, Chen Y, Huo X H, et al. Dynamic task scheduling of multiple unmanned aerial vehicle in battlefield environment[J]. *Computer Engineering*, 2007, 33(10): 36-38.)
- [7] Zhao X, Huang H K, He L J. The contract net protocol with trust model in open multi-agent system[C]. *Proc of Computational Intelligence and Software Engineering*. Beijing: 2009: 1-4.
- [8] 于振华, 刘宇, 蔡远利. 基于扩展合同网协议的无线传感器网络协作方法研究[J]. *控制与决策*, 2009, 24(1): 61-65.
(Yu Z H, Liu Y, Cai Y L. On wireless sensor networks collaboration based on an extended contract net protocol[J]. *Control and Decision*, 2009, 24(1): 61-65.)
- [9] 龙涛, 朱华勇, 沈成林. UCAV 协同中基于协商的分布式任务分配研究[J]. *宇航学报*, 2006, 27(3): 457-463.
(Long T, Zhu H Y, Shen L C. Negotiation-based distributed task allocation for cooperative multiple unmanned combat aerial vehicles[J]. *J of Astronautics*, 2006, 27(3): 457-463.)
- [10] 唐苏妍, 梅珊, 朱一凡, 等. 基于扩展合同网协议的分布式武器目标分配方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2011, 33(3): 568-574.
(Tang S Y, Mei S, Zhu Y F, et al. Distributed weapon target assignment algorithm based on extended contract net protocol[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(3): 568-574.)
- [11] Lesser V, Decker K, Wagner T. Evolution of the GPGP/TAEMS domain-independent coordination framework[J]. *Plenary Lecture*, 2002, 12(1): 1-2.
- [12] 龙涛, 沈成林, 朱华勇, 等. 面向协同任务的多分布式任务分配与协调技术[J]. *自动化学报*, 2007, 33(7): 731-737.
(Long T, Shen L C, Zhu H Y, et al. Distributed task allocation & coordination technique of multiple NCAVs for cooperative tasks[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2007, 33(7): 731-737.)
- [13] 高黎, 沙基昌. 基于合同网的分布式卫星系统任务优化分配研究[J]. *宇航学报*, 2009, 30(2): 815-820.
(Gao L, Sha J C. Research on task optimal allocation for distributed satellites system based on contract net protocol[J]. *J of Astronautics*, 2009, 30(2): 815-820.)
- [14] 刘跃峰, 张安. 有人机/无人机编队协同任务分配方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2010, 32(3): 584-588.
(Liu Y F, Zhang A. Cooperative task assignment method of manned/unmanned aerial vehicle formation[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2010, 32(3): 584-588.)
- [15] Nenad Mladenovi'c, Dragan Urosevi'c, Said Hanafi. Variable neighborhood search for the travelling deliveryman problem[J]. *J of Operations Research*, 2012, 11(1): 58-73.
- [16] Sandro Pirkwieser, Gunther R Raidl. Multilevel VNS for periodic routing problems[C]. *Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization*. Istanbul: Springer, 2010: 226-238.
- [17] Rabinovich Y, Wigderson A. An analysis of a simple genetic algorithm[C]. *Proc of the 4th Int Conf on Genetic Algorithms*. San Mateo: Morgan Kaufmann, 1991: 215-221.
- [18] Marcin Studniarski. Stopping criteria for genetic algorithms with application to multiobjective optimization[C]. *The 11th Int Conf on Parallel Problem Solving from Nature*. Krakow: Springer, 2010: 697-706.
- [19] Asoh H, Mühlenbein H. On the mean convergence time of evolutionary algorithms without selection and mutation[C]. *Parallel Problem Solving From Nature*. Berlin: Springer-Verlag, 1994: 88-97.
- [20] Florian Schmitt, Franz Rothlauf. On the importance of the second largest eigenvalue on the convergence rate of genetic algorithms[C]. *Proc of the Genetic and Evolutionary Computation Conf*. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2001: 559-564.
- [21] Rosenthal J S. Quantitative convergence rates of Markov chains: A simple account[J]. *Electronic Communications in Probability*, 2002, 7(13): 123-128.
- [22] Daniel W Stroock. An introduction to Markov processes[M]. Berlin: Springer, 2007: 25-81.

(责任编辑: 李君玲)