

E-CARGO 模型在 CSP 问题中的描述

滕少华 张 红 刘冬宁 朱海滨 张 巍 梁 路

(广东工业大学计算机学院 广州 510006)

摘 要 基于角色的协同 RBC (Role-Based Collaboration) 是一套研究角色及它们之间复杂关系的方法、理论和技术。在 RBC 中, 群组角色分配 GRA (Group Role Assignment) 既是一个关键问题, 也是一个难题。已有许多研究探讨了基于 Q (Qualification) 矩阵来处理 GRA 问题, 但仅利用 Q 矩阵难以描述问题中的复杂约束关系。因此, 将约束集 (Constraint) 引进 E-CARGO 模型, 提出了带约束的 E_c -CARGO 模型, 研究了 RBC、GRA、SAT (SATisfaction) 和 CSP (Constraint Satisfaction Problem) 之间的联系, 建立了 RBC-GRA-SAT-CSP 问题求解转换关系; 提出应用 E_c -CARGO 模型求解经典 CSP 约束满足问题的方法, 进而描述了应用 GRA 求解 CSP 约束满足问题的通用框架。最后以 N 皇后问题为例, 验证了通过 GRA 的约束指派求解 CSP 问题的有效性。

关键词 基于角色的协同, 群组角色指派, 约束满足问题, E_c -CARGO 模型, N 皇后

中图法分类号 TP301 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.2.050

Constrained E-CARGO Model Applying in CSP Problem

TENG Shao-hua ZHANG Hong LIU Dong-ning ZHU Hai-bin ZHANG Wei LIANG Lu

(School of Computer Science and Technology, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract Role-based collaboration is a set of method, theory and technology which is used to explore the role and the complex relationship among them. In the RBC, group role assignment is a key problem and difficult problem. Many researchers solve GRA problems based on a qualification matrix, but it is difficult to describe the complex constraint relationships of the problems with only one matrix. Therefore, after adding a constraint set to the E-CARGO model, we put forward the E_c -CARGO model with constraints. We also deeply studied the intrinsic relationships among the RBC, GRA, SAT, and CSP, and then produced the transformation relation of RBC-GRA-SAT-CSP. We proposed a method of solving typical CSP constraint satisfaction problems based on E_c -CARGO, and designed a common framework of solving CSP problems with the constraint assignment of GRA. Finally, the N-queen problem was used to verify the validity of our method.

Keywords Role-based collaboration, Group role assignment, Constraint satisfaction problem, E_c -CARGO model, N-queen problem

1 引言

应用角色处理复杂问题的方法已得到广泛应用^[1-4], 其过程是: 按照需求设定一组角色, 通过完成角色指派 (Role Assignment) 实现复杂问题的求解。例如足球队比赛队形选择与转换问题^[4,3,3,1]。而 RBC 则是以角色为基础来研究问题中涉及的元素及其各种关系, 如约束、冲突、提升等, 实现角色间的交互, 从而完成角色协同的目标^[2]。RBC 的角色分配与 GRA 指派的研究已有许多, 并取得了一系列成果^[3]。但由于一个系统增加约束后, 其复杂性将显著增长, 因此带约

束的 GRA 问题尚未得到有效解决。

E -CARGO 模型处理角色赋值指派问题时, 借助 Q 矩阵完成相对简单的约束指派^[4], 但是 Q 矩阵难以描述现实世界中复杂多变的要求, 这限制了 E -CARGO 模型的应用。

对于 CSP 问题的约束表达及求解, 张健^[5]等学者曾利用一阶逻辑方式给予表达; 陈源^[6]等也从不同的角度对约束求解方法进行了比较研究, 例如比较了经典逻辑方法、代数方法以及遗传算法求解等的优劣性; 相关学者也从算法角度 (如启发式动态回溯、弧相容等角度) 研究 CSP 问题求解^[7,8]。

鉴于 RBC 技术的核心是 GRA, 而研究 GRA 的困难在于

收稿日期: 2014-02-25 返修日期: 2014-08-18 本文受教育部重点实验室基金 (110411), 国家自然科学基金 (61272067, 61104156, 61370229, 61402118), 广东省科技计划项目 (2012B091000173, 2013B090200017), 广州市科技计划项目 (2012J5100054, 2013J4500028), 韶关市科技计划项目 (2010CXY/C05) 资助。

滕少华 (1962—), 男, 博士, 教授, CCF 会员, 主要研究方向为大数据、数据挖掘、协同计算、网络安全, E-mail: shteng@gdut.edu.cn; 张 红 (1990—), 男, 硕士生, 主要研究方向为协同计算与数据挖掘; 刘冬宁 (1979—), 男, 博士, 副教授, CCF 会员, 主要研究方向为人工智能逻辑、数据库与协同计算; 朱海滨 (1963—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为自适应协同系统、基于角色的协同等; 张 巍 (1964—), 女, 硕士, 副教授, CCF 会员, 主要研究方向为协同计算、数据挖掘与网络安全; 梁 路 (1980—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为数据库与协同计算。

带约束条件的角色指派,本文通过对 E-CARGO 模型增加一个描述约束的集合,然后利用一阶逻辑方法对约束关系进行形式化抽象描述,将 E-CARGO 模型演化形成 E_c -CARGO 模型;进而研究 E_c -CARGO 模型求解经典 CSP 约束满足问题的方法,提出了应用 GRA 求解 CSP 约束满足问题的通用框架;并以 N 皇后问题为例,验证了本文通过 GRA 的约束指派求解 CSP 问题的有效性。

2 E-CARGO 模型与 CSP 问题

朱海滨^[9]探讨了角色协同技术,提出了 E-CARGO 模型,并将该模型应用在一些约束问题的求解中^[1-4,9-11]。本节简要介绍 E-CARGO 模型和 CSP 问题。

2.1 E-CARGO 模型

定义 1^[9] E-CARGO 模型 Σ 为一九元组, $\Sigma ::= \langle C, O, A, M, R, E, G, S_0, H \rangle$ 。其中 C (Class)是类集合, O (Object)是目标集合, A (Agent)是代理集合, M (Message)是消息集合, R (Role)是角色集合, E (Environment)是环境, G (Group)是组集合, S_0 是初始状态集合, H 是用户集合。

在九元组中, R, A, G 及其关系是 E-CARGO 模型中的重要组件,无论是角色自身内部(R - R)的继承、请求、约束、冲突等关系,还是角色与代理间(R - A)的指派、提升、转移等关系,都可以归结到一个现实世界中真实系统所具有的特性。

因而本文主要讨论角色与代理的指派以及各种对象间的复杂关系,如图 1 所示,代理 a_1, a_2 与 a_3 扮演角色 r_1 与 r_2 ,其中代理 a_2 发生了角色转移,转换前扮演角色 r_1 ,转换后扮演角色 r_2 。

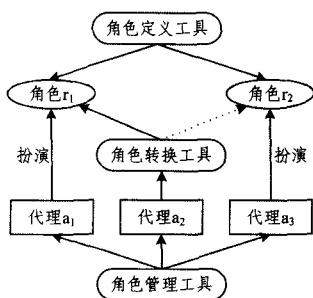


图 1 角色与代理之间的关系

2.2 CSP 问题

人工智能和计算机科学领域中的许多问题都能够转化为约束满足问题(CSP 问题),许多学者研究了 CSP 问题的知识表示及建模技术^[5-15]。很多经典问题亦可应用 CSP 建模求解^[12]。

CSP 问题可用三元组 (X, D, C) 来描述,其中 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 是一个有限变量集合; $D = \{D_1, D_2, \dots, D_n\}$, 其中 $D_i \subseteq D$, D 是值域, D_i 是变量 x_i 的有限值域,对应 $x_i \in D_i$; $C = \{C_1, C_2, \dots, C_k\}$ 是一个有限约束集合,其中任意 $C_j \in C$ 表示变量取值之间的约束关系。

由于 NQP(N-Queen Problem)问题是一个典型 CSP 问题,本文以 NQP 问题为例,描述了应用 E_c -CARGO 模型求解经典 CSP 约束满足问题的方法,不仅需要满足 CSP 问题的三要素 (X, D, C) ,而且需要在群组分配方面体现对象之间的协同及约束特性。这正好符合 E -CARGO 模型处理 NQP 问题的思路。

3 E_c -CARGO 模型

3.1 E_c -CARGO 模型定义

GRA 解决问题的核心在于群组角色指派,由于约束条件限制,使得指派问题难以全部满足,即永真或重言。更多情况往往是处理条件为永假或是可满足,这使得准确描述约束(Constraint)及其基于约束(Constraint)的角色指派成为解决约束满足问题的关键。由于 E-CARGO 模型在约束描述方面不足,因此本文探讨对 E-CARGO 模型进行改进,形成 E_c -CARGO 模型(E_c -CARGO, $\langle C, O, A, M, R, E, G, S_0, H, Cons \rangle$)。

改进 E-CARGO 模型时,需要对 E_c -CARGO 模型的基本赋值指派以及复杂约束 C (Constraint)等给出定义。

定义 2 赋值指派 $\mu: R \rightarrow A$

令 μ 为从 R 到 A 上的一个赋值指派,形如 $\mu: R \rightarrow A$, 其为 R 与 A 的笛卡尔积 $R \times A = \{\langle r_i, a_j \rangle \mid r_i \in R \wedge a_j \in A\}$ 的一个子集。

定义 3(约束 Constraint) 简称 C 。令 C 为 μ 上的一个约束,其一阶语言的定义形如:

$$C ::= r_i \mid r_j \mid \langle r_i, a_j \rangle \mid \neg C \mid C \circ C \mid C \cdot C \mid \forall r_i. C \mid \exists r_i. C \mid \forall a_j. C \mid \exists a_j. C$$

其中, $i, j \in N, r_i \in R, a_j \in A$, $\circ$ 表示集合论与布尔运算符,常见的有 $\vee, \wedge, \neg$; $\cdot$ 表示算术与比较运算符,如 $+, \times, \leq$ 等。

定义 4(约束集 Cons) 令 $Cons$ 为 μ 上的约束集,形如:

$$Cons = \{C_1, C_2, C_3 \dots\}$$

其中 $C_i (i=1, 2, \dots)$ 为满足定义 3 的约束。

定义 5 μ 为 $Cons$ 下的一个赋值指派,形如:

$$\mu_{Cons}: R \times A = \{\langle r_i, a_j \rangle \mid r_i \in R \wedge a_j \in A \wedge C_1, C_2, C_3 \dots \text{是可满足的}\}$$

根据定义 2-5,复杂约束可由一组具有一阶逻辑性质的谓词子句描述。现有的 E-CARGO 模型使用 Q_A 矩阵与 KM 算法已不能满足复杂约束条件下的问题求解。由此必须加入约束集,并寻求新的解决方法,如 CSP 问题就难以用现有的 E-CARGO 模型来描述。

3.2 Group 约束指派

群组指派是 RBC 系统的核心。 E_c -CARGO 模型中群组概念恰好是对 RBC 的一种完善。对 CSP 问题的求解,主要是在满足约束条件下进行 Role 指派。如果能够对一组 Role 进行指派,则问题求解会简化,变得清晰明了。当然,这也许会引发新的约束冲突,这时可通过 E_c -CARGO 模型描述。利用 E_c -CARGO 模型中的群组指派能够清晰地构造出各种约束。根据以上讨论,可以得出如下的基于约束的 Group 定义。

定义 6 $g ::= \{id, e, R_g, A_g, N, J\}$, 其中:

id 表示群组 g 的标识。

e 表示当前群组 g 的运行环境。

R_g 表示当前群组 g 中 role 的集合。

A_g 表示被指派 agent 的集合。

N 表示群组 g 的极大非冲突元组数。

J 表示 role 和 agent 构成的元组集合。形如: $J = \{\langle r_i, a_j \rangle \mid \forall r_p \forall a_k, r_i \neq r_p \wedge \langle r_p, a_k \rangle \in \mu_{Cons} \wedge r_i, r_p \in R_g \wedge a_j, a_k \in A_g \wedge 1 \leq i, p \leq g_m \cdot N\}$ 。

可以看出, Group 为一组不存在冲突的指派角色集合, 它恰好能够满足 GRA 的基本需求, 为了能够准确描述指派过程中的约束关系, 同样需要对满足群组间的约束指派进行定义。群组间的约束指派表示如下。

定义 7 设 g 是 G 的一个群组, g 中一组满足约束的指派 $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$, 如果满足下面条件:

- (1) $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ 的指派不冲突;
- (2) g 的任意一个指派 $\mu' (\mu' \neq \mu_i, i=1, 2, \dots, n)$, 都与 $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ 指派存在冲突。

则 $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ 是 g 的满足约束指派的极大无关约束指派组。

定义 8 设 $Cons$ 为一约束集, $G = \{g_i | i=1, 2, \dots, K\}$; $g_i, g_j \in G$; g_i, g_j 满足 $Cons$; g_i 的极大无关约束指派组为 $\mu_i (i=1, 2, \dots, n)$, g_j 的极大无关约束指派组为 $\nu_j (j=1, 2, \dots, m)$ 。如果 $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n, \nu_1, \nu_2, \dots, \nu_m$ 为 $g_i \cup g_j$ 的极大无关约束指派组, 则称 g_i, g_j 满足群组之间的约束。

定理 1 $\forall g_i, g_j \in G, g_i, g_j$ 满足群组之间约束 $\Leftrightarrow g_i$ 中的任一满足约束的指派 μ 都与 g_j 中所有满足约束的指派 ν 不冲突。

证明略。

有了 Group 及 Group 间的约束指派定义, 就可根据约束条件 $Cons$ 对具体的 CSP 问题进行描述, 从而讨论 CSP 问题的求解。

3.3 Group 与 Role 约束指派转移

与角色指派约束类似, 群组指派的约束定义在处理 CSP 问题时也起关键作用。因而探讨约束条件下, 群组指派与角色指派间的关系就非常重要。群组已在定义 6 中给出, Group 间的约束表达是求解 CSP 问题的关键。Group 间的约束可以转化为通过 Role 间的约束关系来表达。下面讨论 Group 与 Role 约束指派转移。

(1) Role 指派转移

此处, Group 实际上为满足一定约束条件 $Cons$ 的环境下, 一组由 $\langle \text{Role}, \text{Agent} \rangle$ 构成的二元组集合。Group 之间的区别在于 $\mu_{Cons} : R \times A$ 不同。因此, 约束指派转移可以用 $transfer(g_m)$ 函数来定义, 具体定义如下。

定义 9(约束指派转移) $transfer(g_m) : g_m \rightarrow g_m = \{ \exists r_i, a_i, a_j, \text{有} \langle r_i, a_i \rangle \rightarrow \langle r_i, a_j \rangle | r_i \in g_m, R, a_i \in g_m, A, a_j \in g_m, A, 1 \leq i \leq g_m, N, 1 \leq j \leq g_m, N \}$, 满足以下 2 点:

- a) 转移前: $\langle r_i, a_i \rangle \in g_m, J, \langle r_i, a_i \rangle \in \mu_{cons}, \forall j, i \neq j, \langle r_i, a_j \rangle \notin \mu_{cons}$;
- b) 转移后: $\langle r_i, a_j \rangle \in g_m, J, \langle r_i, a_j \rangle \in \mu_{cons}, \forall k, k \neq j, \langle r_i, a_k \rangle \notin \mu_{cons}$ 。

(2) Group-Group 间的约束指派转变

Group 间的不同与约束, 实际上可通过一组 Role 指派来描述。不同的 Role 指派将构造不同的 Group, 可以归结为不同群组间 Role 的约束。下段将描述一类 CSP 问题, 可通过带约束的 Role 指派构造 Group, 使群组元素间的转变都满足 μ_{Cons} 。

此处, 将整个 CSP 问题分解为一系列子问题 CSP_i , 每个子问题通过构造一个群组 $g_i (g_i \in G)$ 来求解, 这样, 各 g_i 之间只要满足组之间的约束, 即 $\bigcup g_i = \bigcup CSP_i$, 就是 CSP 问题的候选解。由此, CSP 问题转化为群组约束指派问题。

根据群组约束指派定义 7 可以看出, 群组间约束指派建

立在满足角色约束指派基础之上, 各组的角色之间不存在冲突。因此, 对于可分解为一系列子问题 CSP_i 的 CSP 问题, 可以通过构造 g_i 来求解。即将 G-G 之间的约束通过满足约束指派, 转变为求解 R-R 之间的约束问题。

4 E_c-CARGO 对 CSP 问题建模

4.1 RBC-GRA-SAT-CSP 及其关系

RBC(Role-Based Collaboration)是基于角色的协同技术, GRA(Group Role Assignment)是群组指派, SAT(SATisfaction)是可满足问题, CSP(Constraint Satisfaction Problem)是约束满足问题。

它们之间的关系描述如下: (1) RBC 的核心是群组分配技术, 它可通过 GRA 的指派来实现; (2) GRA 的指派必须满足问题的约束条件, 即 GRA 指派对问题是可满足的; (3) CSP 问题通过约束条件的描述转化为可满足问题 SAT; (4) CSP 问题可通过带约束的 GRA 指派实现。其转换关系如图 2 所示。本文主要研究应用改进的 E_c-CARGO 模型求解 CSP 问题。

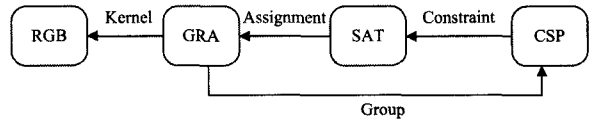


图 2 RBC-GRA-SAT-CSP 转换图

4.2 E_c-CARGO 模型求解 CSP 问题的框架

应用 E_c-CAEGO 模型求解 CSP 问题, 其过程如图 3 所示。具体步骤如下:

E_c-CAEGO 模型求解 CSP 问题的步骤分为 4 个阶段:

- (1) 问题定义: 描述问题, 并将其分解为一系列子问题;
- (2) 角色定义: 依据问题与子问题, 确定一组角色, 并通过约束条件来描述角色之间的复杂关系及约束要求;
- (3) 角色分配: 按子组进行角色分配, 再按群组进行角色分配;
- (4) 角色评估: 对分配结果进行评估, 以确定是否满足问题要求。若评估结果满足要求, 则终止运行; 当不满足约束条件时, 重新进行角色定义或角色分配。

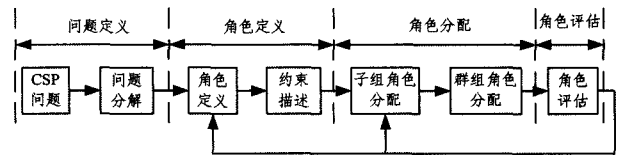


图 3 E_c-CARGO 模型求解 CSP 问题的框架

在处理规模较大的问题时, 可以将多个变量的指派合成一个个子群组, 并在各子群组问题域中寻找其极大无关组, 其中满足约束指派的极大无关组则可作为该子群组的可行解, 若所有变量所在的子群组之间满足组约束关系, 则全部组中所有变量的指派即为该问题域的一个可行解。

5 E_c-CARGO 在 NQP 中的应用

本节以 CSP 中的经典案例 NQP(N-Queen Problem)问题求解为例, 通过引入约束集合 Constraint, 使得对 NQP 问题的约束得以充分描述。下面说明采用 E_c-CARGO 对 NQP 问题进行建模。

构建模型主要集中在约束满足情况下, 对 N 个皇后进行

放置。据此,可以得出表 1 的模型。

表 1 NQP 在 E_C -CARGO 模型中的表述

元素	说明
E(Environment)	环境,NQP 问题中所有元素集合。如棋盘、皇后等
A(Agent)	代理,NQP 中指定为棋盘中能够放置皇后的位置,具有(行,列)属性
R(Role)	角色,NQP 中为皇后,有指派行为
G(Group)	群组,NQP 中描述为一组角色和代理所构成的二元组集合,即 $\langle \text{Role}, \text{Agent} \rangle$
Cons(Constraint)	约束集,NQP 中定义为无冲突的 N 个皇后位置所需满足的约束条件集

5.1 Group 与 Role 约束指派间的关系

基于以上模型,可以对 4 皇后问题进行表述,令 R 表示皇后集合,即 $R = \{r_1, r_2, r_3, r_4\}$, A 表示棋盘位置集合,即 $A = \{a_{ij} | 1 \leq i, j \leq 4\}$,其中 a_{ij} 表示第 i 行、第 j 列的元素位置。通过回溯方法,得出满足约束条件的结果。利用约束指派表示如下:

$$\mu_{Cons}: R \rightarrow A = \{ \langle r_i, a_{ij} \rangle | (c_1 \wedge c_2 \cdots \wedge c_m) \}$$

其中, $c_m \in Cons, r_i \in R, a_{ij} \in A$ 。

利用上述指派,可以得出一组满足约束 $Cons$ 的指派,即为 NQP 问题的一个解,如图 4 所示,具体解为: $\langle r_1, a_{12} \rangle, \langle r_2, a_{24} \rangle, \langle r_3, a_{31} \rangle, \langle r_4, a_{43} \rangle$ 。

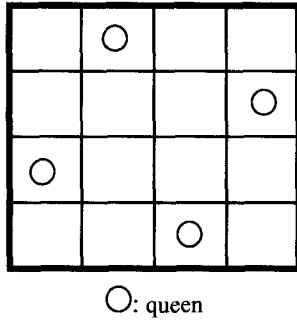


图 4 4-皇后问题

5.2 Constraint 在 NQP 中的详细描述

约束条件在 CSP 问题中起着至关重要的作用,同样,在 E_C -CARGO 模型中,对角色的指派也具有指导性意义。因此,完善而准确地描述约束条件,成为解决 CSP 问题的重要一环。这里仍以 NQP 问题为例进行描述。

传统的约束描述方法在定义约束关系时,显得过于繁杂,即通过用命题逻辑中的二值性进行矩阵列举。如黄达峰^[12]在描述经典约束时,列出所有满足约束条件的序列。对于图 4,利用关系矩阵 C_{ij} 来表述第 i, j 两行所在位置的约束关系如下:

$$C_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad C_{13} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdots$$

$$C_{43} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

经典的命题逻辑解决方案是为每一种可能的赋值 μ 引入一个命题变元,然后将约束条件翻译成命题公式。这对一些规模较小的问题可以利用 SAT 问题来求解,但当角色取值范围较大或约束条件过于复杂时,利用命题逻辑的方法将导致

过多的变元和子句,往往会出现时间或空间复杂度爆炸情况。利用一阶逻辑来表述,则避免了这个问题。对于 N 皇后问题,利用约束集 $Cons$,可以具体描述如下:

$$\mu_{Cons}: R \rightarrow A = \{ \langle r_i, a_{i_1 i_2} \rangle | \forall r_p \forall a_{k_1 k_2}, r_i \neq r_p \wedge \langle r_p, a_{k_1 k_2} \rangle \in \mu_{Cons} \rightarrow j_1 \neq k_1 \wedge j_2 \neq k_2 \wedge (j_1 - j_2) \neq (k_1 - k_2); r_i, r_p \in R, a_{i_1 i_2}, a_{k_1 k_2} \in A \}.$$

这里涉及到一个循环定义问题,即用 μ_{Cons} 定义 μ_{Cons} ,而这也正好说明了 μ_{Cons} 集合的构造是一个回溯问题。

5.3 NQP 中 Group 及约束描述

NQP 中的解可以分为 3 大类:部分解、所有解以及基础解。由于问题本身为一类 NP 难问题,因此构造所有解就变得很费时,尤其是当 N 较大时,求出 NQP 问题的所有解相当困难,更多的是求 NQP 的部分解和基础解,基础解能够通过几何或线性变换获得^[13]。

利用 Group 指派来查找 N 皇后的部分解,是非常快速和有效的,同时也体现出 E_C -CARGO 模型在表达约束问题求解方面的优越性。类似于 Role 的指派,Group 指派是将一个不存在内部冲突的 Group 看作一个新的需要被指派的 r' ,同时将棋盘缩减为 $N/|Group|$ 的规模,如图 5 所示,一个 $N=25$ 的皇后问题,通过引入 $|Group|=5$,可以转换为 5 皇后的群组指派问题。注意到在 Group 指派中,重新赋值的 r' 同样满足对称性以及平移性,这也为求 NQP 的解提供了更多的便利。

根据 E_C -CAEGO 模型求解 CSP 问题的步骤,再应用 Abramson 和 Yang^[14]的求解 NQP 问题的分治算法,以分治划分子群组,首先建立各子组的极大无关组,通过对各子组进行指派,进而推导出整个问题域的解。如以 25 皇后问题为例,运算中可以将子组 $|Group|=5$ 作为一个分治,通过对子组解的求取,推导出 25 皇后中其他分组的指派结果。

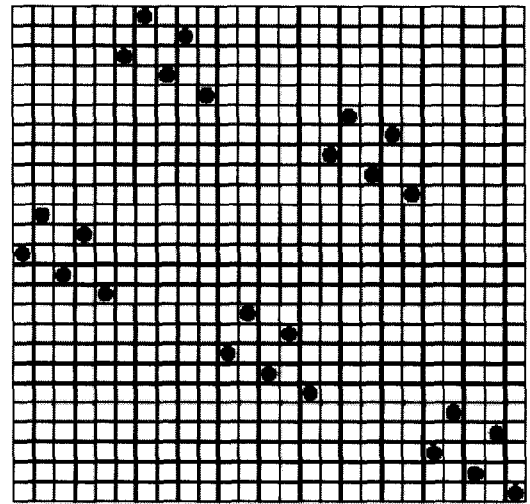


图 5 25 皇后的群组指派

6 约束条件应用——对 NQP 问题求解

求解 N 皇后问题中,典型的方法是非递归算法以及回溯法,这里只讨论对回溯法的优化,传统的顺序回溯法在搜索过程中需要遍历根的所有子树,即遍历整个解空间。根据 N 皇后的对称、顺时及逆时选择等特性,可以对解空间进行裁剪,从而终止对无效解的搜索。

本实验利用动态回溯算法求解 NQP 问题^[15],实验环境是 CPU: Intel Core I5, RAM: 4G, OS: WIN8, 开发语言: C 语

言。实验主要从解空间以及约束传递的角度进行求解,并采用启发式进行求解,定义一个冲突数组 $ArrayofAttack[N]$,每个数组值代表着当前行的冲突数,放置皇后时,每一次选择冲突数最多即约束满足数最少的行进行放置,放置过程为从可指派位置中随机挑选,直到本次放置结束,通过依次回溯,可以求得所有皇后的指派值。由于实验采用随机挑选,因此采用多次平均确定计算求解时长。

定义 10 $D[N]$ 是一个长度为 N 的数组,且 $D[i]=i$, $0 \leq i < N$; $ArrayofAttack[N]$ 是一个长度为 N 的数组,且数组中的元素为该行当前的冲突数; $A[N, N]$ 是一个长度为 $N \times N$ 的数组,且数组中的元素为 a_{ij} ,其中 a_{ij} 表示数组元素的位置; $As(r_i)$ 为角色指派函数。则有 $a_{ij} = As(r_i)$, $0 \leq i, j < N$ 。

根据定义 10,我们不难得到 NQP 问题求解的伪代码,如图 6 所示,其运行结果如图 7—图 9 所示。

输入:未分配的指派 $A = \{(r_1, a_{1j}), (r_2, a_{2j}), \dots, (r_n, a_{nj})\}$

输出:满足约束的指派 A 或 failure

CSP-BACKTRACKING(A)

1. if 指派集合 A 已经结束 then return A
2. var $X=i$, 其中 i 不在指派集合 A 中, 且 i 在冲突集合 $ArrayofAttack[N]$ 中的值最大;
3. var $D[N]=0, 1, \dots, N; k=0, 1, \dots, N$
4. for($m=0; m < D[N]; m++$)
5. 随机选择 k , 将 $D[k]$ 值加入指派集合 A , $a_{ij} = As(r_i)$
6. if 指派集合 A 符合约束 then result=CSP-BACKTRACKING(A)
7. if result $\neq$ failure then return result
8. return failure

图 6 NQP 问题求解伪代码

```
Assignment * CSP::cspBacktracking(Assignment * A)
{
    // step 1
    if(A->size() == count)
    {
        printAssign(A);
        flag=true;
        return A;
    }
    // step 2
    AssignItem * item=getMaxAttack(A);
    // step 3-6
    ArrayList<int> * D=item->D;
    // step 7,8
    while(!D->isEmpty() && !flag)
    {
        srand(time(0));
        int k=rand() % D->size();
        item->value= D->get(k);
        D->removeAt(k);
        Assignment * AA=A->clone();
        AA->add(item);
        cspBacktracking(AA);
        delete AA;
    }
    return A;
}
```

图 7 NQP 问题求解的核心代码

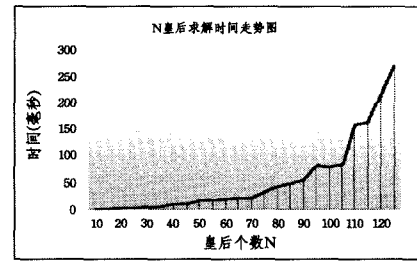


图 8 NQP 回溯求解走势图

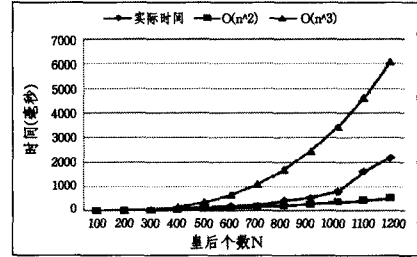


图 9 NQP 回溯求解对比图

由于实验具有随机性,因此对不同皇后个数采用多次平均来求取所用时长的平均值,在进行计算过后,可以得出如图 8、图 9 所示的时间走势图。对于群组指派,也存在类似递归问题,如在求解 125 皇后问题中,可将其转变为对 5 个 25 皇后问题的求解分配,而 25 皇后也可以进一步进行分解,在求解到极大无关组之后,便可依次对问题进行回溯。

结束语 NQP 是一类经典约束满足问题,用 E_c -CARGO 模型求解这类 NQP 问题的关键在于:满足约束条件的角色指派。传统的解决方案集中在对问题解的搜索以及搜索过程中的约束传播。本文以 E -CARGO 模型为基础,从增加约束条件的角度出发,提出了 E_c -CARGO 模型,重点对约束进行了研究,对 GRA 中 Group 带约束的指派进行了详细论述。并以 NQP 问题求解为例,应用 E_c -CARGO 模型建模,实验结果表明本文方法简单有效。另外,由于 RBC 中的 Assignment 问题亦可以看作一类 CSP 问题,因此下一步我们将继续探讨带约束的 Assignment 问题。

实际上,RBC 中的约束可以表述为 Role 与 Role 约束之间的关系,类似的关系还有继承、衍生、请求、提升等^[16]。 E_c -CARGO 在 CSP 问题的应用远不止此,其最终目标在于实现角色的协同,从而提升系统的整体性能,同样 CSP 中也存在类似关系。如何将 CSP 问题求解与 RBC 紧密结合,是下一步的研究方向。

参考文献

- [1] Zhu Hai-bin, Zhou Meng-chu. M-M Role-Transfer Problems and Their Solutions[J]. IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, 2009, 39(2): 448-459
- [2] Liu Lin-yuan, Zhu Hai-bin. Role and Transition Mechanisms in Collaborative Systems[J]. Computer Engineering, 2006, 32(19): 103-104, 107
- [3] Zhu Hai-bin, Alkins R. Group Role Assignment[C]// 2009 International Symposium On Collaborative Technologies and Systems(CTS 2009). 2009: 431-439
- [4] Zhu Hai-bin, Hou M, Wang C, et al. An Efficient Outpatient Scheduling Approach[J]. IEEE Transactions on Automation

- [5] Huang Zhou, Zhang Jiang. Generating SAT Instances from First-Order Formulas[J]. Journal of Software, 2005, 16(3): 327-335
- [6] CHEN Yuan, SHI Zhong-Zhi. The Comparison and Analysis of Solving Approachs to Constrain Satisfaction Problems[J]. Computer Science, 1998, 25(1): 8-12
- [7] Wang Teng-fei, Xu Xhou-bo, Gu Tian-long. Symbolic ADD Algorithms for Arc Consistency and Application in Constraint Satisfaction Problem Solving[J]. Computer Science, 2013, 40(12): 243-247
- [8] Li Hong-bo, Li Zhan-shan, Wang Tao. Improving Coarse-Grained Arc Consistency Algorithms in Solving Constraint Satisfaction Problems[J]. Journal of Software, 2012, 23(7): 1816-1823
- [9] Zhu Hai-bin. Role Mechanisms in Collaborative Systems[J]. International Journal of Production Research, 2006, 44(1): 181-193
- [10] Zhu Hai-bin, Zhou Meng-chu. Efficient Role Transfer Based on Kuhn-Munkres Algorithm[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, 2012, 42(2): 491-496
- [11] Zhu Hai-bin, Zhou Meng-chu, Alknis R. Group Role Assignment via a Kuhn-Munkres Algorithm-based Solution[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, 2012, 42(3): 739-750
- [12] Huang Da-feng. The construction and equivalence analysis of the solutions to the N-Queens Problem[D]. Guangzhou: Graduate School of Sun Yat-Sen University, 2008
- [13] Wang Zi-wen, Li Zhan-shan, Ai Yang, et al. Algorithm for solving constraint satisfaction problems based on dynamic value ordering heuristic[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(4): 832-837
- [14] Abramson B, Yung M. Construction Through Decomposition: A Divide-and-Conquer Algorithm for the N-Queens Problem[C]// Proceedings of the 1986 Fall Joint Computer Conference, 1986: 620-628
- [15] Sun Ji-gui, Zhu Xing-jun, Zhang Yong-gang, et al. An Approach of Solving Constraint Satisfaction Problem Based on Preprocessing[J]. Chinese Journal of Computers, 2008, 31(6): 919-926
- [16] Zhu Hai-bin. Fundamental Issues in the Design of a Role Engine [C]// Proceedings of the 6th International Symposium on Collaborative Technologies and Systems. Irvine, CA, USA, 2008: 399-407

(上接第 216 页)

参 考 文 献

- [1] 李晓磊, 钱积新. 人工鱼群算法: 自下而上的寻优模式[C]// 过程系统工程会议论文集. 2001: 76-82
- [2] 李晓磊, 邵之江, 钱积新. 一种基于动物自治体的寻优模式: 鱼群算法[J]. 系统工程理论与实践, 2002, 22(11): 32-38
- [3] 王兴伟, 秦培玉, 黄敏. 基于人工鱼群的 ABC 支持型 QoS 单播路由机制[J]. 计算机学报, 2010, 33(4): 718-725
- [4] 孙伟, 朱正礼, 郑磊. 基于人工鱼群和微粒群混合算法的 WSN 节点部署策略[J]. 计算机科学, 2012, 39(11): 83-85
- [5] 刘艳林, 马苗, 刘艳丽, 等. 基于改进人工鱼群算法的含噪图像分割方法[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(20): 157-160
- [6] Xiao J M, Zheng X M, Wang X H, et al. A Mdfied Artificial Fish-Swarm Algorithm[C]// Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation. Dalian, 2006: 3456-3460
- [7] 黄华娟, 周永权. 改进型人工鱼群算法及复杂函数全局优化方法[J]. 广西师范大学学报: 自然科学版, 2008, 26(1): 194-197
- [8] Si He, Nabil Belacel, Habib Hamam, et al. Fuzzy Clustering with Improved Artificial Fish Swarm Algorithm[C]// International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization 2009. Hainan, 2009(2): 317-321
- [9] 张大斌, 杨添柔, 温梅, 等. 基于差分进化的鱼群算法及其函数优化应用[J]. 计算机工程, 2013, 39(5): 18-27
- [10] 张凤梅, 邵波. 多峰函数优化的生境人工鱼群算法[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(4): 773-776
- [11] 王培崇, 雷凤君, 钱旭. 改进人工鱼群算法及其收敛性分析[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(3): 616-620
- [12] 李咏梅, 周永权, 姚祥光. 基于追尾行为的改进型人工萤火虫群算法[J]. 计算机科学, 2011, 38(3): 248-251
- [13] 刘薇, 刘柏嵩, 王洋洋. 基于改进鱼群和 K-means 的混合聚类算法[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(22): 119-122
- [14] 段其昌, 唐若笠, 徐宏英, 等. 粒子群优化鱼群算法仿真分析[J]. 控制与决策, 2013, 28(9): 1436-1440
- [15] 陶杨, 韩维, 张磊. 基于群体行为的自适应变异算子鱼群算法[J]. 中国电子科学研究院学报, 2013, 8(5): 491-495
- [16] 刘彦君, 江铭炎. 自适应视野和步长的改进人工鱼群算法[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(25): 35-37, 47
- [17] 欧阳喆, 周永权. 自适应步长萤火虫优化算法[J]. 计算机应用, 2011, 31(7): 1804-1807
- [18] Zhang Zhong-hai. Research of self-adaptive step-changed stochastic resonance using particle swarm optimization [J]. Journal of vibration and shock, 2013, 32(19): 125-130
- [19] 马宪民, 刘妮. 自适应视野的人工鱼群算法求解最短路径问题[J]. 通讯学报, 2014, 35(1): 1-6
- [20] Manber U. Introduction to Algorithms: A Creative Approach [M]. Milano, Italy: Addison-Wesley, 1989
- [21] Krishnanand K N, Ghose D. Glowworm swarm optimisation: a new method for Optimising multimodal functions[J]. International Journal of Computational Intelligence Studies, 2009, 1(1): 93-119
- [22] Qu L, He D. Novel Artificial Fish-school Algorithm Based on Chaos Search [J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(22): 40-42
- [23] Jiang Jing-qing, Bo Yu-ling, Song Chu-yi, et al. Hybrid Algorithm Based on Particle Swarm Optimization and Artificial Fish Swarm Algorithm [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2012, 7367: 607-614
- [24] 张军丽, 周永权. 一种用 Powell 方法局部优化的人工萤火虫算法[J]. 模式识别与人工智能, 2011, 24(5): 680-684
- [25] 吴月萍, 杜奕. 改进的人工鱼群算法的参数分析[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(13): 48-52