

三维网格空间上的自组装模型

窦全胜^{1,2,3} 李国江³ 史忠植² 姜平¹

摘要 对三维网格空间上的自组装模型进行了较为深入的研究,提出了仅依赖局部信息的两个约束条件,从理论上严格证明了这两条约束是确保组装结构侧面连通性的充分必要条件.并进一步指出,对于任意侧面连通结构,均可通过满足上述约束的组装规则组装而成.对 Agent 的状态及行动进行了规定,采用冲突等待的策略有效地解决了并行组装时“死锁”现象的产生,同时,制定了组装点选择策略,以减少中间结构中“孔道”产生,一定程度上提高了组装效率.通过实验对本文提出的组装模型及组装过程中 Agent 状态变化特征进行了验证.

关键词 自组织, 群体智能, 多 Agent 系统, 并行

引用格式 窦全胜, 李国江, 史忠植, 姜平. 三维网格空间上的自组装模型. 自动化学报, 2012, 38(10): 1595–1601

DOI 10.3724/SP.J.1004.2012.01595

Collective Self-assembly Model on Three Dimensional Grid Space

DOU Quan-Sheng^{1,2,3} LI Guo-Jiang³ SHI Zhong-Zhi² JIANG Ping¹

Abstract We deeply studied the self-assembly model on 3D grid space and proposed two constraints which only depend on local information. These two constraints were strictly proved in theory to be the sufficient and necessary condition for the connectivity of the assembly structure side. Furthermore, any side-connective structure can be assembled by the assembling rules which satisfy the above constraints. We defined the state and behavior of the agent, and the “deadlock” during parallel assembly was effectively avoided by taking the collision delay strategy. Meanwhile, the assembly point selecting strategy was formulated so as to reduce the generation of “pore canal” in the intermediate structure, which improves the assembly efficiency to a certain extent. The assembly model proposed in this paper and the variation features of the agent state during the assembly process were verified by experiment.

Key words Self-organization, swarm intelligence, multi-agent system, parallel

Citation Dou Quan-Sheng, Li Guo-Jiang, Shi Zhong-Zhi, Jiang Ping. Collective self-assembly model on three dimensional grid space. *Acta Automatica Sinica*, 2012, 38(10): 1595–1601

在多 Agent 系统研究领域, 群体自组装 (Collective self-assembly) 越来越引起人们的注意, 群体自组装是指仅具备局部能力的 Agent 群体, 在没有总体规划和中心控制的前提下, 根据目标要求, 应用局部规则完成某种复杂结构的过程. 在广义上, 如白

蚁筑巢行为、简单细胞构成复杂器官、简单机器人控制、纳米材料自组装等诸多现象都可归类于此模型. 在此类模型中, 每个 Agent 本身功能简单、容易实现, 可通过合作共同完成宏观上相对复杂的工作, 这一现象在自然系统中普遍存在. 目前, 关于群体自组装研究多与简单机器人协同控制有关, 其最终目标是: 研制开发出各类结构简单、低成本的微型机器人, 在人力难以到达和控制的危险工作环境中, 根据局部信息和环境变化, 自组织地完成复杂的宏观任务, 例如封堵海底石油泄漏、火灾阻断等. 同时, 群体自组装研究对复杂自适应系统 (Complex adaptive system, CAS)、涌现 (Emergence) 等领域研究也具有较强的借鉴意义. 当前在该领域的研究主要包括: 1) 文献 [1] 利用正方形组块, 通过“信息素”进行个体间交互, 在二维空间上模拟了“拱形”结构的组装过程. 2) 文献 [2] 中的 Agent 为正三角形组块, 也实现了特定结构的组装, 就其本质而言, 无论正方形和正三角形组块, 其组装过程并无根本区别. 3) 文献 [3] 提出了在 Agent 自组装过程中的垃圾清理问题, Agent 需要识别结构中没用的部分,

收稿日期 2011-12-19 录用日期 2012-04-17
Manuscript received December 19, 2011; accepted April 17, 2012

国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (2007CB311004), 国家自然科学基金 (60970088, 61035003, 61272244, 61173173, 60970105), 山东省博士基金 (2009BSD01383) 资助

Supported by National Basic Research Program of China (973 Program) (2007CB311004), National Natural Science Foundation of China (60970088, 61035003, 61272244, 61173173, 60970105), and Doctor Foundation of Shandong Province (2009BSD01383)

本文责任编辑 赵千川
Recommended by Associate Editor ZHAO Qian-Chuan
1. 山东工商学院计算机科学与技术学院 烟台 264005 2. 中国科学院计算技术研究所 北京 100190 3. 山东师范大学信息科学与工程学院 济南 250014

1. School of Computer Science and Technology, Shandong Institute of Business and Technology, Yantai 264005 2. Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190 3. College of Information Science and Engineering, Shandong Normal University, Jinan 250014

并及时清理,对噪音条件自组装有一定意义.在此基础上,一些研究者开始着手三维空间上的自组装研究,4)文献[4]对待组装点做了物理限制,利用立方体组块来模拟三维结构的组装,但其组装过程的完备性缺少必要的理论支持.事实上,总可以找到每一步都满足其约束,但最终不能完成组装任务的极端情况.5)文献[5-6]通过硬件实现了机器人自组装过程的仿真.但其研究存在如下问题:首先,在其仿真过程中,结构受重力作用,隐含了底部侧面优先的先决条件.从而弱化了问题的复杂程度;其次,由于受实验条件限制,机器人的数量还不能达到“群体”规模,其组装过程本质上是串行的;Bowyer^[6]设计出了一种能够自动挤出聚合物泡沫的机器人,并对白蚁“建巢”过程进行了模拟,模拟结果与实际的蚁巢在局部上有一定的相似性.同时,Bowyer还用泡沫造出了墙和拱等结构.所不足的是,该系统中机器人的行为是事先规划好的.严格意义上,这样的系统还不能算作自组装系统.另外还有一些有意义的工作^[7-12],由于篇幅关系在此不再逐一列举.

在上述研究工作中,研究者从各自角度和假设出发,给出了不同的结论和结果,缺乏一致的标准.为此,文献[13-18]提出如下模型:在二维或三维网格空间上,给定初始安装点和目标结构,Agent为正方形或立方体,不能相互穿越,Agent之间没有直接通信,根据结构的变化和自身的状态来决定所采取的动作;根据局部信息和简单规则,并行地完成目标结构.

本质上,这一模型的关键在于:当目标结构的体积远大于Agent时,只掌握局部信息的Agent如何并行地完成目标结构,且不产生“死锁”.针对这一问题,本文给出一种Local-to-global控制策略及三维网格空间上的自组装模型,模型在并行的条件下,可以组装三维空间上的任意侧面连通结构,以下就其细节进行详细阐述.

1 相关符号与定义

设 G_n 为坐标系 i, j, k 撑起的 $n \times n \times n, 1 \leq n < +\infty$ 三维网格空间, G_n 上的Agent为占据一个网格节点且具有六个或开放(Opened)或封闭(Closed)侧面,在自由移动的立方体,本文中称这种Agent为“组块”(Block),如图1所示.

设 f_x 为组块 b 的某一侧面,符号 $[f_x(b)]$ 或 $[b]$ 表示 b 在 G_n 中的位置, $\sim f_x$ 表示 b 上与 f_x 相对的另一个侧面,若 f_x 与 i 轴垂直,则 $(f_x)^{jc}, (f_x)^{ja}, (f_x)^{kc}, (f_x)^{ka}$ 分别为 f_x 绕轴 j 和 k 顺时针和逆时针方向的两个相邻侧面; $[f_x(b)] + n$ 表示 G_n 上, b 所在位置沿 f_x 所对方向移动 n 个网格所对应位置,

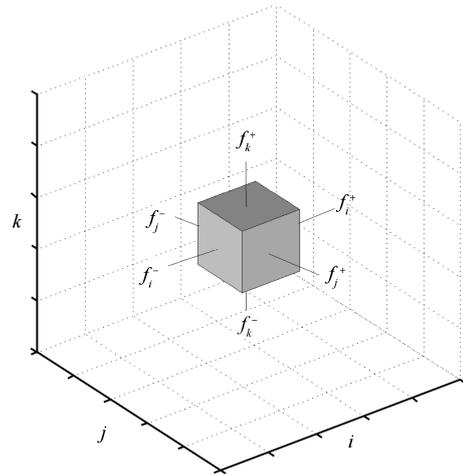


图1 三维网格空间的组块

Fig.1 Assembly block on 3D grid space

基于以上符号,显然以下关系成立:

- 1) $[f_x(b)] + n = [\sim f_x(b)] - n;$
- 2) $\sim f_i^+ = f_i^-;$
- 3) $(f_k^+)^{jc} = f_i^+.$

类似这样的关系还有许多,不再列举.

进一步,若组块 b 的某一侧面 f_x 是开放的,且 $[f_x(b)] + 1$ 处存在组块 b' ,则组块 b 的 f_x 侧面可以与 b' 的侧面 $\sim f_x$ 相互连接,构成 G_n 上的一个结构,若组块与结构之间满足连接条件,可以不断重复上述连接过程,进而形成更加复杂的结构.

这里称两个相互连接的侧面为内部侧面(Inside face).在自组装过程中,一个侧面一旦成为内部侧面就不再变化.除结构的边缘侧面外,若侧面状态由开放变成封闭,则该侧面一定是与某个组块组装变成了内部侧面.本文并不关心结构的内部侧面,若无特殊强调,以下提到的侧面均指非内部侧面.

定义 1. 设 $f_1, \dots, f_n, n = 2, 5$ 为结构 C 中的 n 个侧面,若某一组块的 n 个相邻侧面可以与 f_1, \dots, f_n 全部连接,则称 f_1, \dots, f_n 为结构 C 的 n -相关侧面(n -related faces).

设 C 为 G_n 上的结构, C 包含的所有组块集合记为 $C(\cdot, \cdot, \cdot), C$ 在 (u, v, w) 处的组块记为 $C(u, v, w), C$ 中所有 $k = w$ 的组块集合记为 $C(\cdot, \cdot, w),$ 即结构 C 在 $k = w$ 处与 k 轴垂直的切面:若 (u', v', w') 处不存在 C 的组块,但此处为可组装点,则该点记为 $\hat{C}(u, v, w).$ C 所有的可组装点集合记为 $\hat{C}(\cdot, \cdot, \cdot), \hat{C}(\cdot, \cdot, w)$ 则表示 C 的所有 k 轴坐标为 w 可组装点.用 $F_{\partial k}(w)$ 表示 $C(\cdot, \cdot, w)$ 所有除 f_k^+, f_k^- 侧面外的侧面集合.

定义 2. 设 C 为网格空间 G_n 上结构,若 $\hat{C}(\cdot, \cdot, \cdot)$ 为空,则称 C 为最终结构,否则称 C 为某一最终结构 C_{terminal} 的中间结构.

定义 3. 称 $C(\cdot, \cdot, w)$ 为 $k = w$ 时单层侧面连通, 当且仅当对于 $\forall f \in F_{\partial k}(w)$, 存在侧面序列 f_0, f_1, \dots, f_m , 满足:

- 1) $f_0, f_1, \dots, f_m \in F_{\partial k}$, 且 $f_0 = f_m = f$;
- 2) f_k 与 f_{k+1} 互为相邻侧面, $0 \leq k \leq m-1$;
- 3) 除 f 外, $F_{\partial k}$ 中所有侧面在序列 f_0, f_1, \dots, f_m 中出现且仅出现一次.

定义 4. 称三维空间结构 C 关于 k 轴侧面连通, 当且仅当对于任意 w , 若 $C(\cdot, \cdot, w)$ 不为空, 则 $C(\cdot, \cdot, w)$ 必是 $k = w$ 时单层侧面连通.

显然, 对于另外两个坐标轴 i, j , 也存在类似的定义.

2 三维结构侧面连通的充分条件

以 k 轴为例, 对于 k 轴的任意切面 $C(\cdot, \cdot, w)$, 考察 $\forall p \in \widehat{C}(\cdot, \cdot, w)$ 及 p 的某一侧面 $f_x \in F_{\partial k}(w)$, 由于不包括 f_x^+ , f_x^- 侧面, 因此无需考虑 f_x 按哪个坐标轴旋转的问题, 为了描述便利, 分别用 f_x^a, f_x^c 表示 f_x 按顺时针和逆时针方向的两个相邻的侧面, 则 p 满足以下约束条件:

C1. p 点的 f_x 和 $\sim f_x$ 封闭, 与 f_x^a 和 f_x^c 开放不同时成立;

C2. p 点的 f_x 侧面封闭, $\sim f_x, f_x^c (f_x^a)$ 侧面开放, 与 t 点存在固定组块, 不同时成立, 其中 t 为 p 点沿 $\sim f_x$ 方向移动一个网格, 再向 $f_x^c (f_x^a)$ 方向移动一个网格对应的位置.

定理 1. 若切面 $C(\cdot, \cdot, w)$ 为 $k = w$ 时单层侧面连通, b 为一组块且 $[b] \in \widehat{C}(\cdot, \cdot, w)$, C' 为结构 C 与组块 b 连接得到的新结构, 则 C' 为侧面连通结构的充分必要条件是 $[b]$ 满足约束 C1 和 C2.

定理 1 的证明, 我们已在关于二维自组装模型的研究中给出, 此处不再重述.

定理 2. 设 G_n 为 $n \times n \times n$ 网格空间, $e, e = i, j, k$ 为 G_n 的某一坐标轴, C_{terminal} 为任意边界范围大于 1 小于 n 的关于 e 轴侧面连通最终结构, 则对于 C_{terminal} 的任意 e 轴侧面连通的中间结构 C , 必存在满足约束 C1 和 C2 的待组装点.

证明. 不妨取 $e = K$, 由结构 C_{terminal} 边界大于 1 小于 n , 组块可以在结构的周边移动, 因此只需考察中间结构 C 关于 e 轴侧的每一切面 $C(\cdot, \cdot, w)$ 即可, 即若 $\widehat{C}(\cdot, \cdot, w)$ 不为空, 则必存在满足上述约束 C1 和 C2 的待组装点.

由定义 2 和定义 3 可知, $C(\cdot, \cdot, w)$ 中存在相邻侧面序列: $f, f_1, f_2, \dots, f_m, f$, 其中, $f, f_1, \dots, f_m \in F_{\partial k}(k)$ 且除 f 外, $F_{\partial k}(w)$ 中所有侧面在该序列中出现且仅出现一次.

若 $\widehat{C}(\cdot, \cdot, w)$ 不存在满足约束的组装点, 不妨假

设上述序列中 f_i 所对的节点不满足约束 C1 或 C2, 根据约束条件, 则序列中必存在一个与 f_i 相对 (或斜相对) 的侧面 f_j 使得该节点不满足约束, 从而上述序列被分成两个子序列: f_i, f_{i+1}, \dots, f_j 和 f_j, f_{j+1}, \dots, f_i .

若 f_j, f_{j+1}, \dots, f_i 所对节点为待组装点, 且均不满足约束 C1 和 C2, 则 f_i, f_{i+1}, \dots, f_j 侧面所对的节点中必有满足约束的待组装点.

不难看出, 除 f_i 与 f_j 侧面共同面对的节点 p 外, f_i, f_{i+1}, \dots, f_j 侧面所对的节点中, 必存在其他待组装点. 若不存在, p 连接组块后必使上面的两个子序列中的侧面不连通, C_{terminal} 则为侧面不连通结构.

按顺序继续考察序列 f_i, f_{i+1}, \dots, f_j , 不妨假设 $f_u, f_v, u, v \in (i, j)$ 所对节点 p' 为待组装点, 由 p' 不满足约束, 则根据上述过程可知, 除 p' 外, 序列 f_u, f_{u+1}, \dots, f_v 所对节点中, 必存在其他待组装点, 否则 C_{terminal} 为非侧面连通结构. 重复上述过程, 可得 f_i, f_{i+1}, \dots, f_j 所对节点中有无穷多个不满足约束 C1 和 C2 的待组装点. 而 f_i, f_{i+1}, \dots, f_j 是有限序列, 两者矛盾. 故而 f_i, f_{i+1}, \dots, f_j 侧面所对的节点中, 必存在满足约束 C1 和 C2 的待组装点. \square

定理 1 说明的是: 对于三维侧面连通结构的任意切面, 在每一次组装只要满足约束 C1 和 C2 所得的切面一定是侧面连通, 进而整个结构也是侧面连通的. 而定理 2 进一步指出: 对于任意侧面连通结构, 均可通过满足 C1 和 C2 的组装规则组装而成, 上述定理奠定了本文自组装模型的理论基础.

3 组块状态与自组装模型

3.1 Agent 的状态及动作

在自组装模型中, 每个 Agent 目标结构本身没有全局认识, 独立地运行其内部程序, Agent 之间也没有直接的通信, 而是根据环境的变化和自身的状态来决定下一步动作.

本文中, Agent 包括 Idle, MAC (Moving around construction), PA (Prepare assembly), Waiting, Assembled 五个状态, 每个状态执行的动作及后续状态在表 1 中有详细的说明.

初始时 Agent 的状态为 Idle, 在网格空间内均匀分布, 随机移动, 当其在待组装点时, 状态转成 MAC. 在这个状态下, Agent 沿结构边界随机移动, 搜索使侧面封闭最多, 且满足约束 C1 和 C2 的组装点. 若发现这样的组装点, 则移动至该点, 这一过程是动态的, 即在移动的过程中随时可能发现新的最优组装点. 若当前位置就是最优组装点, 状态转成

PA.

表 1 Agent 的相关状态和行动

Table 1 The related states and actions of agent

State	Action
Idle	在空间中随机移动, 发现正在组装的结构则状态转至 MAC;
MAC	令 $e = FindOptimalPoint(b)$, 若 $e = null$, 则在结构周边随机移动, 若 e 不为空且恰好为当前位置, 状态转至 PA; 否则 Agent 向 e 移动;
PA	若满足条件 C1 和 C2 则组装, 状态转至 Assembled; 否则执行以下动作: 1) 若冲突的组块状态为 PA; 则转向 Waiting, 随机等候; 2) 否则状态转至 MAC;
Waiting	随机等待时间 t , 转为 PA;
Assembled	—

不难发现: 定理 1 和定理 2 只保障了当单个 Agent 与结构组装时, 结构的侧面的连通性, 但却不能保证多个 Agent 并行组装时不发生“死锁”. 换句话说, 同时组装的组块有可能违反约束 C1 和 C2. 因此, 状态为 PA 的 Agent 在进行组装之前, 将其他状态是 PA 的 Agent 看作是结构的一部分进行检查, 若当前位置满足的约束, 则状态转为 Assembled, 否则转到 Waiting. 此时, 必存在一个或多个状态为 PA 的 Agent, 造成了当前的冲突. 同样地, 这些造成冲突的 Agent 状态也会由 PA 转到 Waiting. Agent 在 Waiting 状态时并不做任何动作, 只是随机的等待一段时间. 由于等待的时间是随机的, 当一个 Agent 的等待结束后, 再次检查是否满足 C1 和 C2; 若对方还在等待, 此时 Agent 满足约束, 则状态转为 Assembled. 而另一 Agent 等待结束后, 与之冲突的 Agent 状态已经变为 Assembled, 该组块不满足 C1 或 C2, 状态转为 MAC. 进而避免了并行条件下“死锁”现象的产生.

3.2 组装点选择

通过上文的论述, 不难看出若组块遵循表 1 所述状态与规则, 即可避免“死锁”的产生, 完成三维网格空间上的任意侧面连通结构.

在组装的过程中, 由于 Agent 没有全局的规划, 在并行组装的条件下, 结构中会产生一些“孔道”. 上述约束的本质就是避免这些“孔道”的入口被组块提前占用, 造成“孔道”内部的待组块无法得到组装: 另一方面, 即便这些“孔道”入口不被占用, 由

于这些“孔道”仅能使较少的组块通过, 一定程度上会影响组装的效率, 所以在组装点的选择上, 不仅要满足上述约束 C1 和 C2, 还要尽量减少组装过程中结构内部“孔道”的产生. 本文采用如下策略来完成这一任务.

令 $fset(i)$, $i = 1, \dots, 5$ 分别表示在 Agent 四周 i - 相关侧面所对应的组装点集合. 最优点选择具体过程如下:

```

function  $e = FindOptimalPoint(b)$ 
temp = null
for  $i = 5$  to 1
  if  $fset(i)$  is not null
    select point  $p$  from  $fset(i)$  randomly
    if  $p$  satisfy C1 and C2
      temp =  $p$ ;
      break loop;
    else
      delect  $p$  from  $fset(i)$ ;
    end if
  end if
end for
return  $e = temp$ 

```

由上述过程不难看出, 组装点搜索过程中, 在遵守约束 C1 和 C2 的前提下, 总是优先选择使 Agent 侧面封闭最多的组装点, 当存在多个这样的候选点时, 算法从多个候选点中随机地选择一个作为组装点. 这里需要说明的是: 由于 Agent 只能把握其周边的局部信息, 而当结构体积远大于 Agent 时, 上述组装点选择策略也只能“尽可能”的减少中间结构中“孔道”的产生, 如何彻底避免“孔道”现象, 对于仅具有局部能力的 Agent 而言, 问题变得些许复杂, 需要进一步引进新的约束, 我们将在下一步工作中继续深入研究.

4 实验过程及结果

以下实验主要验证以下两个问题:

1) 本文所述系统能够组装三维网格空间上的任意侧面连通结构

本节通过实验证明本文所述模型的正确性, 以“立方体”、“机器人”、“金字塔”和“伞形”结构为例. 初始时组块均匀分布在 $20 \times 20 \times 20$ 网格空间内, 组块个数分别为 343、201、816 和 808 个, 图 2 包括了组装过程中的中间结构和最终结构.

为进一步说明问题, 图 3 为以上四个结构的执行时间与完成比例的关系曲线. 图 3 中, 横坐标为执行时间, 纵坐标为完成结构的比例. 从图中可以看出, 在组装初期组装的效率较高, 每个结构的大部分

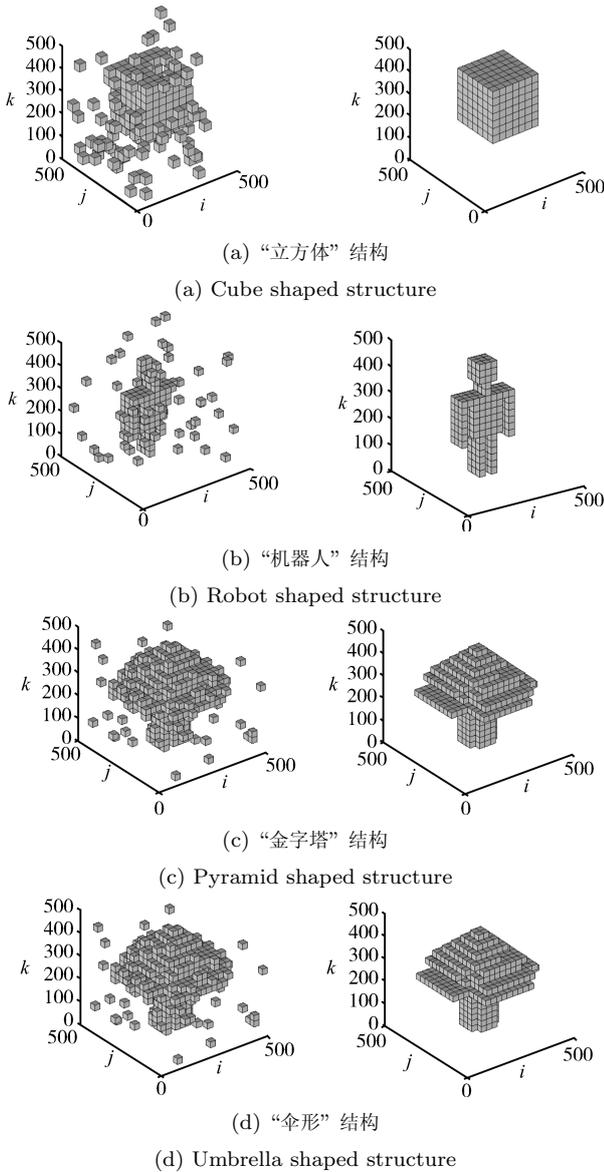


图 2 “立方体”、“机器人”、“金字塔”和“伞形”四个侧面连通结构的组装过程

Fig. 2 Assembly procedures of cube shaped structure, robot shaped structure, pyramid shaped structure and umbrella shaped structures

组装是在这期间完成的, 而后来的小部分结构却占用了大部分时间. 其原因为: a) 在系统执行的早期, 系统并行化程度高, 随着 Agent 的状态不断变成 Assembled, 状态为 Idle, MAC 的 Agent 数量逐渐减少, 并行化程度减弱; b) 随着结构的逐渐完成, 且中间结构不可避免的各种类型“孔道”的存在. 只具有局部能力的 Agent 在体积远大于自身的结构上寻找合适的组装点, 耗费了大量的时间.

2) 组装过程中, 不同状态 Agent 变化特征

以“立方体”结构为例, 考察不同状态 Agent 变化特征, 图 4 为不同状态 Agent 的变化曲线. 在

图 4 中, G_n 为 $15 \times 15 \times 15$ 网格空间, “立方体”结构的边长为 13. 图 4(a)~4(c) 分别为状态为 Assembled、Idle 和 MAC 的 Agent 变化曲线 (运行 10 次的平均曲线), 图 4(d) 为每一时间步上并行组装的 Agent 变化曲线. 图中大体呈现了自组装过程的四个阶段.

第一阶段: 组装初期 Agent 在网格空间内寻找结构的初始组装点, 当最初组装的结构较小时, 结构的开放侧面也相对较少, 并行程度较低. 从图 4 可以看出, 四条曲线的变化相对平缓.

第二阶段: 随着结构的逐渐增大, 状态为 Idle 和 Assembled 的 Agent 呈指数级下降和增长, 如图

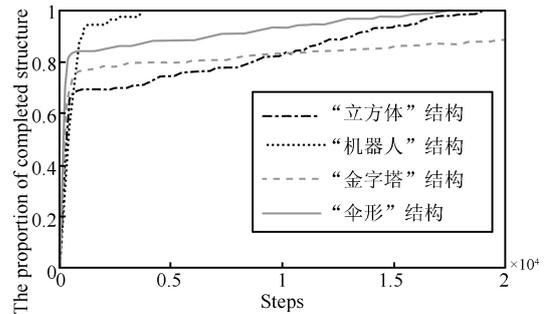
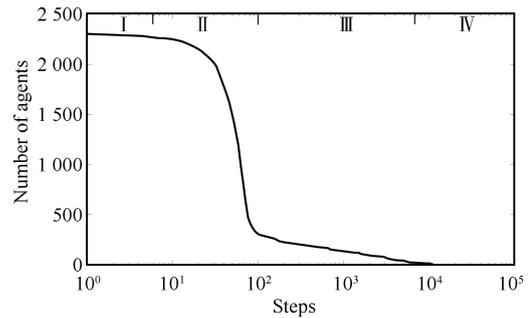


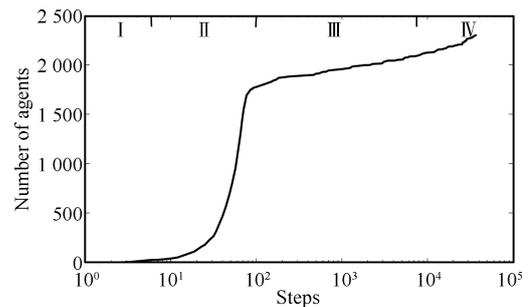
图 3 “立方体”、“机器人”、“金字塔”和“伞形”结构执行时间与完成比例的关系曲线

Fig. 3 The relation curves between the execution time and completion proportion for cube, robot, pyramid, and umbrella shaped structures



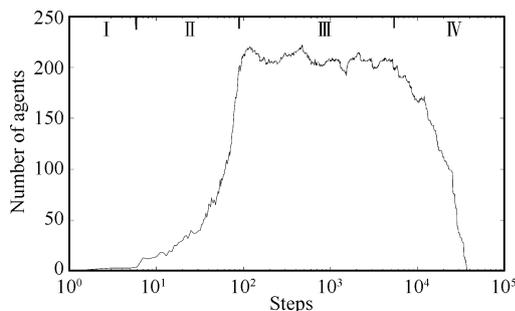
(a) Assembled 状态下 Agents 变化曲线

(a) Agent variation curves in the state of assembled



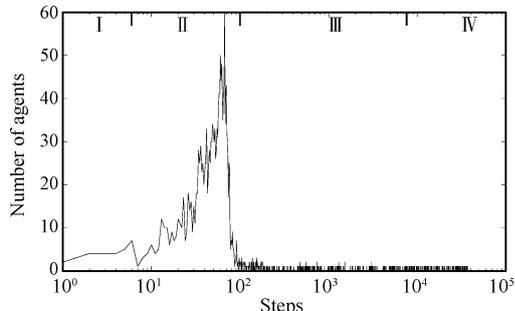
(b) Idle 状态下 Agents 变化曲线

(b) Agent variation curves in the state of idle



(c) MAC 状态下 Agents 变化曲线

(c) Agent variation curves in the state of MAC



(d) 状态同时转化成 Assembled 的 Agent 变化曲线

(d) Agent variation curve when all the states change into assembled simultaneously

图 4 组装过程中不同状态 Agents 变化曲线

Fig. 4 The variation curves of agents in different states during the assembly process within a cube shaped structure

4(a) 和图 4(b) 所示. 从图 4(c) 和图 4(d) 也可以看出, 状态为 MAC 的 Agent 数量急剧增大, 系统并行程度逐渐达到最大, 一个时间步上同时组装的 Agent 最大可以达到 60 个. 在这个阶段只耗费了 0.2% 的总时间, 却完成了超过 75% 的目标结构.

第三阶段: 状态为 Idle 和 Assembled 的 Agent 数量变化曲线再次变得平缓, 状态为 MAC 的 Agent 在一段时间内也保持相对稳定. 图 4(a)~4(c) 中, 系统的并行程度急剧减小, 图 4(d) 中, 一个时间步上同时组装的 Agent 不超过 10, 状态为 Idle 转成 MAC 的 Agent 与状态为 MAC 最终转为 Assembled 的 Agent 数量保持基本平衡.

第四阶段: 所有状态为 Idle 的 Agent 状态转为 MAC, Agent 在结构周边寻找最后少数待组装点, 直至所有待组装点都被植入组块, 组装过程结束.

事实上, 系统中 Agent 状态变化与结构本身相关. 例如, 三维空间中的一个“单一柱”状结构, 并行组装的 Agent 不会超过 2. 由于结构千差万别, 我们无法对其形状特征进行定量的描述, 只能定性地对结构特征进行大致的刻画. 当目标结构在网格空间上的各个方向的比例相近, 并且由相对均匀组块排

列构成时, 组装过程中并行性等特征与“立方体”结构的组装过程类似.

5 结论

在自组装模型中, 仅具备局部能力的 Agent 群体, 需要在没有总体规划和中心控制的前提下, 根据目标要求, 应用局部规则完成某种复杂结构. 其难点在于: 当目标结构的体积远大于 Agent 时, 只掌握局部信息的 Agent 如何并行的完成目标结构, 且不产生“死锁”.

本文对三维网格空间上的自组装模型进行了较为深入的研究, 提出了仅依赖局部信息的两个约束条件 C1 和 C2, 从理论上严格证明了这两条约束是确保组装结构侧面连通性的充分必要条件. 并进一步指出: 对于任意侧面连通结构, 均可通过满足上述约束的组装规则组装而成, 从而奠定了三维网格空间上自组装模型的理论基础.

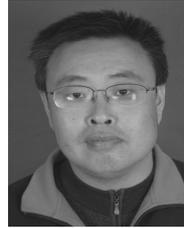
约束 C1 和 C2 只保障了单个组块组装时, 结构的侧面的连通性, 并不能完全避免多个组块并行组装时“死锁”的产生. 为此, 我们对 Agent 的状态及行动进行了规定, 采用冲突等待的策略有效地解决了这一问题; 同时, 制定了减少中间结构中“孔道”产生的组装点选择策略, 一定程度上提高了组装效率.

最后通过实验, 对本文提出的模型进行了验证, 并以“立方体”这一典型结构为例, 研究了组装过程中, 各状态组块的变化特征.

References

- 1 Mason Z. Programming with stigmergy: using swarms for construction. In: Proceedings of the 8th international conference on Artificial Life VIII. Cambridge, MA: MIT Press, 2002. 371–374
- 2 Parker C A C, Zhang H, Kube C R. Blind bulldozing: multiple robot nest construction. In: Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Las Vegas, USA: IEEE, 2003. 2010–2015
- 3 Guo Y, Poulton G, Valencia P, James G. Designing self-assembly for 2-dimensional building blocks. Guo Y, Poulton G, Valencia P, James G. Designing self-assembly for 2-dimensional building blocks. 14-18 July 2003, Melbourne, Australia; In: Proceedings of the 2th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems. Berlin: Springer, 2003. 75–89
- 4 Werfel J, Nagpal R. Three-dimensional construction with mobile robots and modular blocks. *International Journal of Robotics Research*, 2008, **27**(3–4): 463–479
- 5 Petersen K, Nagpal R, Werfel J. TERMES: an autonomous robotic system for three-dimensional collective construction. *Robotics: Science and Systems Conference*, 2011, **VII**: 249–251

- 6 Bowyer A. Automated Construction Using Co-operating Biomimetic Robots. Technical Report 11/00, University of Bath Department of Mechanical Engineering, Bath, UK, 2000, 89–116
- 7 Gardelli L, Viroli M, Omicini A. Design patterns for self-organizing multiagent systems. In: Proceedings of the 2nd International Workshop on Engineering Emergence in Decentralised Autonomic Systems (EEDAS 2007). University of Greenwich: CMS Press, 2007, 61–70
- 8 Serugendo G D M, Gleizes M P, Karageorgos A. Self-organisation and emergence in MAS: an overview. *Informatica*, 2006, **30**(1): 45–54
- 9 Prokopenko M, Rajah P M, Wang P. On convergence of dynamic cluster formation in multi-agent networks. In: Proceedings of the 8th European Conference on Advances in Artificial Life. Berlin: Springer-Verlag, 2005. 884–894
- 10 Yamins D, Nagpal R. Automated global-to-local programming in 1-D spatial multi-agent systems. In: Proceedings of the 7th international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems. Richland, SC: International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2008. 615–622
- 11 Yu C H, Nagpal R. A self-adaptive framework for modular robots in a dynamic environment: theory and applications. *International Journal of Robotics Research*, 2010, **30**(8): 1015–1036
- 12 Lacko P, Kvasnička V, Pospíchal J. An emergence of game strategy in multiagent systems. *International Journal of Computational Intelligence and Applications*, 2004, **4**(3): 283–298
- 13 Karuna H, Valckenaers P, Saint-Germain B, Verstraete P, Zamfirescu C B, Van Brussels H. Emergent forecasting using a stigmergy approach in manufacturing coordination and control. In: Proceedings of the 3rd International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems. Berlin: Springer, 2005. 210–226
- 14 Werfel J. Building blocks for multi-agent construction. In: Proceedings of Distributed Autonomous Robotic Systems (DARS2004). Toulouse, France, 2004. 275–281
- 15 Werfel J, Bar-Yam Y, Nagpal R. Building patterned structures with robot swarms. In: Proceedings of the 19th International Joint Conference on Artificial Intelligence. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2005. 1495–1502
- 16 Werfel J, Nagpal R. Extended stigmergy in collective construction. *IEEE Intelligent Systems*, 2006, **21**(2): 20–28
- 17 Werfel J, Bar-Yam Y, Rus D, Nagpal R. Distributed construction by mobile robots with enhanced building blocks. In: Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Orlando, USA: IEEE, 2006. 2787–2794
- 18 Werfel J, Ingber D, Nagpal R. Collective construction of environmentally-adaptive structures. In: Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. San Diego, CA: IEEE, 2007. 2345–2352



窦全胜 博士, 山东工商学院计算机与技术学院副教授. 主要研究方向为智能科学理论与方法, 数据挖掘, 多主体技术, 群体智能. 本文通信作者.

E-mail: li.dou@163.com

(**DOU Quan-Sheng** Ph.D., associate professor at the School of Computer Science and Technology, Shandong Institute of Business and Technology. His research interest covers intelligent scientific theory and method, data mining, multi-agent technology and swarm intelligence. Corresponding author of this paper.)



李国江 山东师范大学信息科学与工程学院硕士研究生. 主要研究方向为多主体技术, 群体智能.

E-mail: lihail238@163.com

(**LI Guo-Jiang** Master student at the College of Information Science and Engineering, Shandong Normal University. His research interest covers multi agent technology and swarm intelligence.)



史忠植 中国科学院计算技术研究所研究员. 主要研究方向为智能科学理论与方法, 知识工程, 神经计算, 数据挖掘, 机器学习. E-mail: shizz@ics.ict.ac.cn

(**SHI Zhong-Zhi** Professor at the Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences. His research interest covers intelligent scientific theory and method, knowledge engineering, neural computing, data mining, and machine learning.)



姜平 山东工商学院计算机与技术学院讲师. 主要研究方向为人工智能, 生物信息计算.

E-mail: jiangping19792005@163.com

(**JIANG Ping** Lecturer at the School of Computer Science and Technology, Shandong Institute of Business and Technology. His research interest covers artificial intelligence and biological information calculation.)