

多模态融合的多机器人任务分配算法研究

段俊花¹, 朱怡安¹, 黄姝娟^{1,2}, 陆伟^{1,2}

(1.西北工业大学 计算机学院, 陕西 西安 710072; 2.西北工业大学 软件与微电子学院, 陕西 西安 710072)

摘要:针对分布式任务分配中的资源竞争冲突问题以及解的质量和求解代价难以协调的问题,提出了一种基于多模态融合的多机器人分布式自组织任务分配算法。它将基于信息素的隐式交互机制、基于视觉的阈值模型任务分配机制和基于通信的显式协商协调机制等相结合,实现了未知环境下多机器人系统的多模态分布式自组织任务分配。仿真实验结果表明,多模态融合技术扩大了机器人的感知范围,提高了系统可靠性,而且在较少通信的情况下,有效解决了任务分配冲突问题,提高了任务执行效率。

关键词:分布式任务分配;多机器人系统;多模态

中图分类号: TP302

文献标志码: A

文章编号: 1000-2758(2013)06-0974-05

分布式任务分配是多机器人系统协作的一个主要课题,其突出难点是冲突问题^[1]、解的质量和求解代价问题^[2]。完全分布式任务分配必然会出现资源竞争冲突,解决冲突问题和提高解的质量会增加求解代价。如何有效地解决这3个问题是分布式任务分配的研究难点。文献[1]通过在多个机器人之间传递 token 的方法来避免任务分配冲突问题,试图通过少量的 token 来降低通信代价,但是当 token 丢失时,机器人任务分配将无法完成,而且当机器人数目较多时效率会非常低。Ducatelle 等^[3]采用基于流言机制的通信系统应用于多机器人任务分配,避免拍卖方法中的投标和精细的分配过程,但是当通信失效时,它的自适应性和鲁棒性也非常差。以上工作都没有脱离系统对通信的完全依赖。Sarker 等^[4]应用自适应阈值模型进行大型车间机器人之间的任务分配,是一种群智能方法,不依赖通信交互,但是会出现较多机器人同时选择相同任务的冲突问题。

多模态(multi-mode)融合技术通过多种通道进行信息获取、分析与融合,弥补了单一通道(或称为单一模态)在信息表达效率和完整性上的不足,在一些领域得到成功应用^[5],是提高系统性能的一个

有效途径。本文提出了一种多模态融合的分布式任务分配算法(multi-modality task allocation algorithm, MMTAA)将视觉信息、通信信息和信息素信息相融合,互相补充,来完成分布式任务分配。

1 多机器人分布式任务分配问题

多机器人对未知区域有害废弃物的清理是多机器人系统的一个典型应用。如图1所示,未知区域里随机散布着若干需要清理的目标物。其中,“ ”表示环境中自身不能移动的目标物,“*”表示在环境中进行随机搜索的机器人。本文实验要求将12

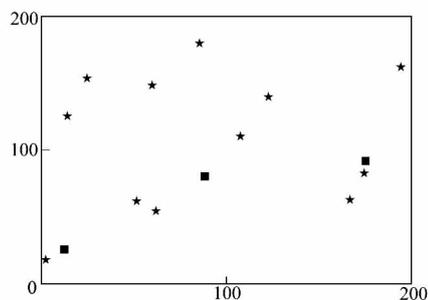


图1 机器人实验场景图

收稿日期: 2013-03-02

基金项目: 航天科技创新基金(2011XR160001)、航空科学创新基金(20130753006)与西北工业大学基础研究基金(JC20110283)资助

作者简介: 段俊花(1979—),女,西北工业大学讲师,主要从事人工智能、多智能体系统等研究。

个机器人合理分配给 3 个任务,要求每个机器人以尽量短的时间和路程到达任务处。任务分配决策过程由机器人群体以分布式、自组织方式完成。

定义 1 设给定任务集 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$, 多机器人集合 $R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$, 每个任务所需机器人数为 $N = \{n_1, n_2, \dots, n_m\}$ 。任务分配可用映射描述: $\varphi: T \times R \rightarrow \{R_1, R_2, \dots, R_m\}$ 其中 $R_i = \{r_j \mid r_j \in R, 1 < j < n\}, 1 < i < m$ 。

定义 2 机器人 r_j 选择参与任务 t_i , 我们称机器人 r_j 当前状态为 r_j^i 。

定义 3 1 个有效的任务分配应该满足以下条件: (1) 每个机器人 r_j 在同一时间只能参与 1 个任务 t_i 执行; (2) 每个任务 t_i 的参与者总数应等于所需机器人数 n_i , 即 $\sum_{r_j \in R_i} r_j^i = n_i$ 。

定义 4 假设完成任务 t_i 所需的机器人数为 n_i , 当 $\sum_{r_j \in R_i} r_j^i > n_i$ 时, 选择任务 t_i 的机器人总数超过所需机器人人数, 则称系统出现任务分配冲突问题。

在本文实验环境中, 多出的参与者对任务完成没有作用, 而且造成机器人资源浪费, 同时也影响其他任务的尽早完成, 如何避免或较早发现这种任务分配冲突并予以解决, 是本文的一个研究重点。

2 多模态融合的分布式任务分配算法

2.1 多模态融合策略

本文中机器人具有 360° 视觉传感器、信息素传感器和通信模块 3 种感知和交互方式。视觉传感器通过视觉观察环境中的任务和同伴, 但是视觉范围有限。信息素传感器可以在环境中遗留某种物质, 用来间接地告诉同伴自己的行踪。通信模块是机器人之间直接交互的手段, 可以互相传达一些意图和请求。3 种交互方式互相补充, 使多机器人系统获得更全面的信息。多模态融合策略如图 2 所示。

1) 阈值模型分配层

基于视觉信息的任务分配是本文的基础方法, 主要采用阈值模型分配方式, 这是一种自组织任务分配方法, 其思想来源于蚁群劳动分工机制, 通过感知任务的紧迫性来调节机器人的选择, 具体方法见本文作者论文^[6]。

2) 隐式底层交互层

隐式底层交互借鉴蚁群信息素的思想, 通过机

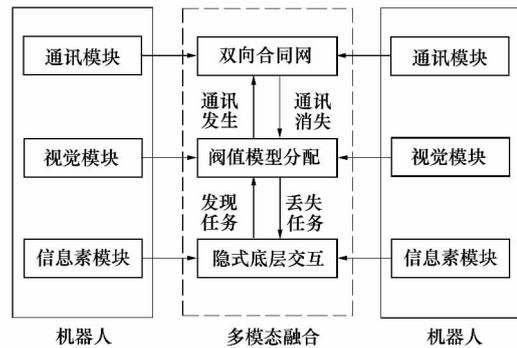


图 2 多模态融合策略

器人在环境中遗留的信息素来增加机器人之间的间接通信, 扩大机器人的感知范围。本文设计的信息素强度可随时间的推移逐渐减弱, 这样可以避免无用信息素误导作用。

3) 双向合同网协议层

基于通信的协商, 采用具有双向选择性质的合同网协议, 即通过较少通信解决阈值模型分配中的任务冲突问题, 让机器人提前发现任务冲突问题。本文采用双向选择的双向合同网协议, 具体协议内容如下:

① 招标决策

定义第 1 个到达任务 t_i 处的机器人 r_j 为该任务的领导者 $Leader_i$, 若同时有多个机器人 $R'_i = \{r_j \mid r_j \in R\}$ 到达, 则根据机器人自身的 ID 号定义优先级。 $Leader_i$ 向通信范围内的其他机器人发出招标信息并等待投标。

② 投标决策

机器人 r_j 根据视觉和通信获得的信息综合进行选择, 如果选定目标 $t_i \in T$ 在其他机器人的招标任务中, 则向发出者 $Leader_i$ 发送投标信息, 若不在招标任务中, 则不理睬招标信息, 向自己选定的目标前进。

本文设计的通信范围大于视觉范围, 招标信息同时扩大了机器人的信息范围, 本文将通信中的任务添加到机器人可感知任务中, 最后统一通过阈值模型选择最佳任务。

③ 中标决策

任务 t_i 的领导者 $Leader_i$ 在一定时间范围内统计收到的投标消息, 并根据任务需求选择需要的投标机器人 $\{r_j' \mid r_j' \in R\}$, 对选中机器人发中标消息。

本文设计的双向选择合同网协议中, 机器人对

发出的消息不必等待返回信息,这样就降低了机器人对通信系统稳定性的要求。另外,机器人只向自己选中的任务返回投标消息,可以减少不投标消息发送的代价。领导者对不中标的机器人不发送不中标消息,这些措施都减少了系统通信量。招标过程并不一定同时发生,网络拥堵的情况也不会成为通信系统的主要问题,比较适合于分布式计算环境。

2.2 多模态融合任务分配算法 MMTAA

本文的任务分配方法为多机器人系统分布式自组织地完成,下面从系统层的宏观角度和个体层角度 2 个视角来介绍多模态的任务分配方法。

从系统层角度,整个任务分配算法(MMTAA)以自组织分布式的方式完成,算法主要流程概述如下:

1) 系统初始时,所有机器人 $r_j \in R$ 通过基于视觉的阈值模型对任务进行初步的分布式自组织分配,完成第 1 次任务分配;个体在向选定任务前进的过程中,在环境中遗留信息素;

2) 在第 1 次任务分配的基础上,对每个任务 $t_i \in T$ 通过最先到达者为领导者的机制,自组织产生任务 t_i 的领导者 $Leader(i)$;

3) 由每个任务 t_i 的领导者 $Leader(i)$ 采用本文的双向选择合同网协议,确定任务的最终参与者 $\{r_j^i | r_j^i \in R\}$,未被选中的成员放弃该任务,并通过阈值模型重新选择目标;

4) 每个任务 t_i 的领导者 $Leader(i)$ 每隔一定周期检查任务是否完成,未完成则继续招标,直到所有任务都完成。

5) 若个体一直不能发现任务,则通过访问其他个体遗留的信息素,向离自己最远的信息素前进。

从个体层角度,个体基于多模态获得的信息进行综合决策,选择自己要参与的任务,具体任务选择策略如下:

① 初始状态下,个体 r_j 首先根据基于视觉的阈值模型选择相应的任务 t_i ,进入 ③;若观察不到任务,则漫游,进入 ⑧;

② 非初始状态下,个体判断自己是否有任务执行,若有则进入 ③;否则进入 ⑦;

③ 执行任务的个体判断自己是否到达选定任务处,若到达,则进入 ④,否则进入 ⑤;

④ 判断自己能否成为 t_i 的领导者,若能成为领导者则进入 ⑤,否则在任务处等待其他参与者到达,并进入 ⑥;

⑤ 每隔一定周期检查任务是否完成,未完成则对任务 t_i 进行合同网招标,并进入 ⑧;

⑥ 若个体没有到达任务处,则根据视觉信息和通信信息,依据双向合同网协议再次选择任务并进入 ⑧;

⑦ 对不能发现任务的个体,访问环境中的信息素,向其它方向运行;

⑧ 反复执行 ② ~ ⑧,直到任务完成。

3 仿真实验与分析

仿真实验在 matlab 环境下实现的。环境采用 200×200 的栅格地图表示,每个机器人和任务分别占用 1 个栅格。任务静止在某个位置,机器人只能朝上下左右 4 个方向运动,每次移动 1 个栅格。定义机器人能力参数为:视觉范围 $S_Scope = 80$,通信范围 $C_Scope = 120$,信息素感知范围 $P_Scope = 80$ 。

3.1 冲突问题解决

我们首先比较单纯依赖视觉的阈值模型分配方法(threshold method, TM)与多模态融合算法(MMTAA)的实验效果。为了便于结果比较分析,本次实验定义任务完成后机器人原地不动。

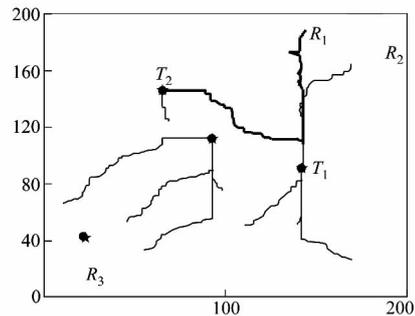


图 3 阈值模型分配法实验结果

从实验结果我们可以看出单纯使用阈值模型时(见图 3)机器人可以完成部分任务分配,任务 T_2 没有分配成功,机器人 R_2 、 R_3 由于视觉范围有限找不到任务,一直处于漫游状态。机器人 R_1 和 R_2 都是先选择离自己近的任务 T_1 ,结果快到任务处时发现 T_1 已经完成,出现了任务选择冲突,遂转向任务 T_2 ,在这个过程中浪费了自身的能力资源,延长整个任务完成时间。在多模态融合实验中(见图 4),机

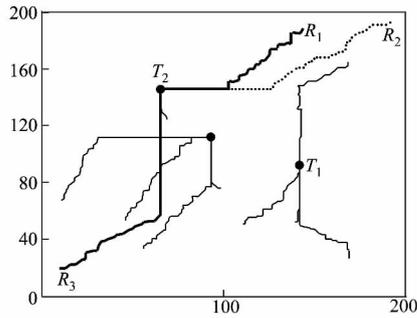


图 4 多模态融合算法实验结果

机器人 R_2 和 R_3 通过访问同伴的信息素分别找到任务,而且通过双向合同网机制使得 R_1 提前退出了任务分配冲突问题。

3.2 任务执行代价分析

我们对上述 TM 和 MMTAA 2 种方法进行任务完成时间对比分析。随机生成 50 组实验场景数据,分别用 TM 和 MMTAA 2 种方法进行求解比较所有任务完成后系统消耗的时间。

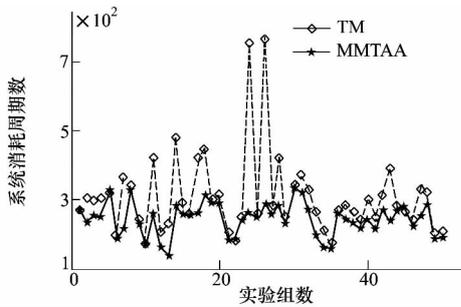


图 5 运行时间对比图

从图 5 可以看出 MMTAA 方法下机器人完成任务所需时间明显小于 TM 方法。其中有些实验中二者完成任务时间几乎相近,这是由于该实验场景中任务分布较均匀,任务均在机器人视线范围内,而且机器人选择任务的冲突很小,此时 2 种方法效率相当。

3.3 任务执行效率分析

设定每个任务的生存期为 $TaskLife$,任务到达生存期时还没有足够的机器人到达则自动消失,每个任务所需机器人都到达后需要 $FinishTime$ 的完成时间,每个任务完成或消失后环境中再随机生成 1 个新的任务,原任务的参与者投入到新的任务分配中。

我们设计了 4 种方法:①单模态方法(阈值模

型法,Threshold);②双模态融合一(阈值模型+信息素,TwoMode1);③双模态融合二(阈值模型+双向合同网机制,TwoMode2);④多模态融合(MMTAA)。

分别对这 4 种方法进行 50 次实验,每次实验的初始实验场景相同,每次仿真周期为 1 000, $TaskLife = 250$, $FinishTime = 20$,统计每种方法下成功完成的任务数(finished task number)和未完成的任务数(unfinished task number)的平均值。

表 1 实验统计结果对比表

算法	Finished Task Number	Unfinished Task Number
Threshold	9.65	6.162 5
TwoMode1	11.1	4.662 5
TwoMode2	11.2	4.537 5
MMTAA	13.4	2.775

如表 1 所示,可以明显看出双模态融合算法(TwoMode1,TwoMode2)任务完成数要高于单一模态的 Threshold 方法,多模态融合算法(MMTAA)完成任务数要高于双模态任务完成数,说明模态的增加有利于提高机器人执行任务效率。从未完成的任务数比较,多模态融合算法未完成的任务数最小,说明多模态融合算法可靠性最高。

4 结 论

本文采用多模态融合的思想,将机器人通过信息素进行的隐式交互、通过视觉进行的阈值模型任务分配机制以及基于通信的显式协商协调机制相结合,实现了未知环境下多机器人系统的分布式自组织任务分配。本文设计的多模态分布式任务分配算法 MMTAA 具有以下这些优点:①系统的可靠性更高,机器人具有 3 种交互能力,当某一种能力失效时,有其他能力作为补充,减少了对单一能力的依赖性;②系统求解质量更高,当任务分配有冲突时,加入市场机制可以较早地发现冲突并协商解决,明显地提高了任务分配质量;③通信能耗较少,本文设计的双向选择合同网机制,通信信息数较少,通信应答要求较低,不仅降低通信能耗,而且降低了机器人对通信系统稳定性的要求。

参考文献:

- [1] Farinelli Alessandro , Iocchi Luca , Nardi Daniele. Conflict Resolution with Minimal Communication Bandwidth. Proceedings of DIS 2006: IEEE Workshop on Distributed Intelligent Systems-Collective Intelligence and Its Applications , Prague , Czech Republic , 2006
- [2] Kalra Nidhi , Martinoli Alcherio. A Comparative Study of Market-Based and Threshold-Based Task Allocation. Distributed Autonomous Robotic Systems 7: Springer Japan , 2006 , 91-101
- [3] Ducatelle F , Forster A , Caro G , Di A , et al. New Task Allocation Methods for Robotic Swarms. 9th IEEE/RAS Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions , 2009
- [4] Sarker Md Omar Faruque , Dahl Torbjrn S. A Robotic Validation of the Attractive Field Model: An Inter-Disciplinary Model of Self-Regulatory Social Systems. Proceedings of 7th International Conference on Swarm Intelligence , 2010 , Brussels , Belgium
- [5] Wahlster Wolfgang. SmartKom: Foundations of Multimodal Dialogue System(Cognitive Technologies) . Springer-Verlag , New York , 2006
- [6] 段俊花 , 朱怡安. 基于群智能的多智能体系统系统结构设计与应用. 西北工业大学学报 , 2012 , 30(1) : 124-128
Duan Junhua , Zhu Yi'an. A New and Effective Design and Application of Swarm-Intelligence-Based Multi Agent System Architecture. Journal of Northwestern Polytechnical University , 2012 , 30(1) : 124-128 (in Chinese)

A New Multi-Robot Task Allocation Algorithm Based on Multi-Modality Synthesis

Duan Junhua¹ , Zhu Yian¹ , Huang Shujuan^{1 2} , Lu Wei^{1 2}

(1. Department of Computer Science and Engineering , Northwestern Polytechnical University , Xi'an 710072 , China)
(2. Department of Software and Microelectronics , Northwestern Polytechnical University , Xi'an 710072 , China)

Abstract: In distributed task allocation , it is hard to balance three problems: conflict , solution quality and solving price. Multimodal synthesis method is put forward for multi-robot distributed and self-organized task allocation. Three models of cooperation mechanism are combined; these three models are conflict problem , which is implicit cooperation mechanism based on pheromone , implicit task allocation realized by threshold method based on robot visual sense , and explicit task allocation based on improved contract net mechanism. The experiment results and their analysis show preliminarily that multimodal synthesis method can expand the scope of the robot perception , improve the system reliability , resolve the conflict problem by less communication , and improve the task execution efficiency.

Key words: algorithms , computer simulation , decision making , efficiency , energy conservation , flowcharting , information fusion , MATLAB , reliability , robots , sensory perception , time and motion study; distributed task allocation , multi-modality , multi-robot system