

未知环境下分布式多机器人避碰协作算法

周兰凤^{1,2}, 徐芳²

(1. 上海应用技术学院计算机科学与信息工程系, 上海 200235; 2. 哈尔滨工业大学计算机科学与技术学院, 威海 264209)

摘要: 针对多机器人协作问题, 提出一种未知环境下分布式多机器人协作避碰算法。该算法基于分布式投标模型协调多机器人运动, 改进过去算法的前提假设, 综合考虑机器人的实际尺寸和传感误差, 通过自适应设定投标时间, 提高算法的效率, 针对通信延时引起的信息不一致, 采用按优先级顺序进行探测的方法。仿真实验验证了该算法的可行性。

关键词: 未知环境; 多机器人协作; 避碰

Distributed Multi-robot Coordination Algorithm for Collision Avoidance in Unknown Environments

ZHOU Lan-feng^{1,2}, XU Fang²

(1. Dept. of Computer Science and Information Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 200235;

2. School of Computer Science and Technology, Harbin Institute of Technology, Weihai 264209)

【Abstract】 Aiming at coordination question of multiple robots, this paper presents a distributed coordination algorithm for collision avoidance between robots in unknown environments. This algorithm is based on a distributed bidding model to coordinate the movement of multiple robots. Past assumptions are not used in the coordination algorithm. Both the data error of the sensors and physical size of the robot are taken into account. By adjusting adaptively the bidding time parameter, the efficiency of the algorithm is improved. To overcome the problem of information inconsistency caused by communication delay, a probing method is developed by the prior order. Simulation test is made to prove the feasibility of the algorithm.

【Key words】 unknown environments; multi-robot coordination; collision avoidance

1 概述

随着机器人应用领域和范围的不断扩展, 一些复杂任务仅靠单机器人已经很难胜任^[1], 必须通过多机器人的合作来完成。因此, 多移动机器人协调与合作问题近些年引起了极大的关注。

相对于集中式控制的机器人系统, 分布式多机器人系统(Distributed Multi-Robot Systems, DMRS)^[2]以其突出的鲁棒性、灵活性、容错性和并行性, 以及广泛的应用前景(例如扫雷、多卫星防御系统和星际探索等), 已经成为人工智能和机器人学领域新的研究热点。

在DMRS中, 合作任务的完成与否取决于团队成员的联合作, 并非某一个体的单独行动, 因此, 机器人在执行任务时, 除具有通常的自身模型和环境模型外, 还需要对与之协作的其他机器人进行建模, 包括意图、行动能力、状态等。由于分布式系统设计中强调各机器人的完全自主性, 不存在所谓的中央协调器, 因此, 在控制策略中, 机器人之间的信息交互方式对其合作能力、效率和系统可靠性都具有重要的影响, 也就是说, 作为机器人之间2种常用的交互模式, 通信和感知是多机器人系统协调问题的关键因素。一般把机器人基于传感的信息交互也归结为通信方式, 称为隐式通信, 而把机器人之间按照一定的协议、规范发送或接受信息称为显式通信。

目前, 已经有一些多机器人协作方法被提出, 文献[3]研究了一种异步分布式多机器人探测算法, 该算法引入了边界

栅格的概念, 其基本思想是让每一个机器人单独向最近的边界栅格移动, 具有较好的容错能力, 然而, 对于同一边界栅格, 多机器人会停止探测, 因此它们的算法协调性能较差。文献[4]研究了一种基于市场经济的多机器人探测策略, 该方法沿用了文献[5]研究中投标协议的基本概念。该算法改进了市场体系中通过协商进行探测的可靠性、有效性和鲁棒性。然而, 其采用的目标生成算法不如基于边界的算法有效, 而且协商过程比较复杂。

以上研究均假设通信是持续的, 然而, 实际情况并非如此。因为通信范围是有限的, 有时某个机器人或几个机器人可能移出其他机器人的通信范围, 导致通信隔断。

针对上述问题, 文献[6]提出了一种可靠有效的多机器人协调算法。该算法基于分布式投标模型协调多机器人运动, 解决了通信延时引起的信息不一致的问题, 采用一种新颖的编码机制降低了通信网络中断时各子网所需的数据交换量。然而, 该方法采用恒定的投标时间, 降低了算法的效率, 而且算法中的假设限制了其在实际中的应用:

- (1) 机器人为一质点, 没有实际尺寸;
- (2) 传感信息是精确可靠的, 不存在测量误差。

基金项目: 哈尔滨工业大学(威海)研究基金资助项目(HIT(WH)ZB200810)

作者简介: 周兰凤(1966-), 女, 副教授、博士, 主研方向: 智能机器人, 自主导航, 分布式系统; 徐芳, 讲师、硕士

收稿日期: 2009-09-03 **E-mail:** lfzhou@hit.edu.cn

2 多机器人探测模型

2.1 环境和机器人模型

本文采用栅格法对环境进行建模,环境中存在任意形状的障碍物。在探测过程中,每一个栅格具有3种可能状态:占有(occupied),空(free)和未知(unknown)。这里,占有(occupied)意味着栅格被障碍物占有,空(free)意味着该栅格没有障碍物,未知(unknown)是指该栅格还未被任何机器人的范围传感器探测。机器人的形状是以 r_0 为半径的圆。每个机器人 R_i 具有地图创建、定位和通信的能力,机器人用激光传感器感知相邻栅格。机器人的感知范围是以机器人为中心,以 r_s 为半径的圆。机器人移动时停止感知和地图创建。机器人在自己的局部地图中能够自定位,且在通信范围 r_c 内,能够直接与其他机器人进行信息交换。图1和图2分别给出了机器人模型和环境模型。

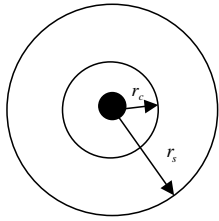


图1 机器人模型

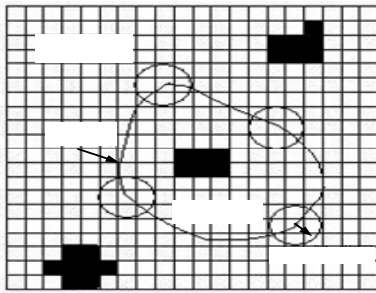


图2 环境模型

2.2 接近度

对于每一个机器人,它与其他机器人保持通信的连接能力由与其他机器人的距离来确定。考虑传感器的误差和机器人的实际尺寸,上述距离的计算公式如下:

$$\lambda_i = e^{-\frac{d_1 - 2r - e_i - e_j}{r_c}} + \alpha e^{-\frac{d_2 - 2r - e_i - e_j}{r_c}} + \dots + \alpha^{n_k - 2} e^{-\frac{d_{n_k - 1} - 2r - e_i - e_j}{r_c}} \quad (1)$$

其中, $d_1 \leq d_2 \leq \dots \leq d_{n_k - 1}$ 是子网中2个机器人之间递增距离值 $d(R_i, R_j)$ (未考虑传感器的误差和机器人的实际尺寸), $j \in \{1, 2, \dots, n_k\}$,并且 $i \neq j$, k 是子网中机器人数量; r_c 是通信范围; α 为一衰减因子,且 $\alpha \in (0, 1)$; r 为机器人安全半径(即机器人半径 r_0 加上一个安全距离)。传感器的误差为

$$e_i = \min(r_i \cdot \xi, r_i - r) \quad (2)$$

其中, r_i 为探测点到探测机器人的距离; $\xi = 2\pi/N$ 为传感器扫描一圈的数据个数,在本文中,激光传感器每圈扫描360个数据,因此 $\xi = 2\pi/360 = 0.017454$; $r_i \cdot \xi$ 是传感器的分辨率; $r_i - r$ 是出于移动安全考虑 $r_i - e_i \geq r$ 所得的。

3 分布式协调控制算法

假定机器人之间的相对位置对所有机器人来说是已知的, n 个机器人从相近的初始位置出发,力争以最快速度探测未知增益和最小的代价探测未知环境,这里的代价是指当前位置到目标点的位置。所有机器人异步工作,在任意时刻,每一

个机器人为下列3种状态之一:(1)感知和地图创建;(2)投标;(3)移动。机器人的状态变迁如图3所示。

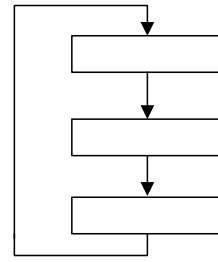


图3 机器人的状态变迁

3.1 感知和地图创建

在这个阶段,机器人利用范围传感器探测其感知区内栅格的状态(即占有或者空),通过自身的传感器或来自同一子网内的其他机器人的地图更新使得机器人获得新的环境信息,这时,该机器人便更新其局部地图。该机器人也把新获得的地图信息向同一子网的所有其他机器人广播。然后,基于局部地图,辨识边界栅格。这里,边界栅格是至少与一个未知栅格相邻的“空”的栅格,如图4中的灰色栅格。一旦感知和地图创建步骤完成,机器人便确定其子网中是否有当前投标话路,该话路通过检查当前时间和最好的投标开始时间来结束。如果有当前投标话路,则机器人等待下一次投标话路而不是参与目前的话路;如果没有当前投标话路,则机器人向子网中所有其他伙伴发送新的地图更新。如果地图未完成,则意味着有更多的边界栅格,机器人会确定下一个准备前往的边界栅格。

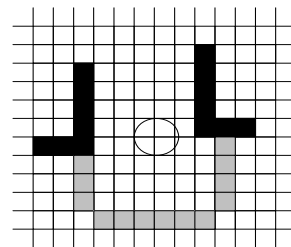


图4 边界栅格示意图

感知区

3.2 投标计算

在投标之前,机器人首先需要计算每一个边界栅格的信息增益 I_i ,对于一个具体的边界栅格 i ,其信息增益为感知区的未知栅格数,这些未知栅格不包括其他感知和地图创建阶段的机器人感知区的未知栅格和那些移动机器人的目标栅格。然后,机器人利用迪杰斯特拉(Dijkstra)算法计算到达每一个边界栅格的最短移动距离 D_i 。 λ_i 由式(1)计算,考虑传感器的误差和机器人的实际尺寸后,边界栅格 i 的净增益可由下式计算:

$$g_i = \omega_1 I_i - \omega_2 (D_i + \text{通信区} e_i) + \omega_3 \lambda_i \quad (3)$$

其中, ω_i 是大于0的权值, $i \in \{1, 2, 3\}$; e_i 为机器人自定位误差。所有边界栅格中最大的增益为投标机器人的投标 B :

$$B = \max_i g_i$$

3.3 自适应投标

投标机器人向相同子网内所有其他机器人广播它的投标 B ,并等待投标时间 t_{bid} 以获取它们的反应消息。如果在此时间内,没有其他机器人参与目前的投标话路,或者没有其他的机器人提供更好的投标,该机器人便投标获胜;如果在那

个时间内, 有一个或几个其他机器人完成了感知和地图创建步骤并发送了新更新的地图, 则该投标机器人基于新的局部地图重新计算它的投标并再次广播投标。如果这个机器人收到了其他机器人更好的投标, 它便会等待获胜者宣布其 ID。一旦获胜者被确定, 它的目标就是已知的, 则该机器人基于已更新的信息重新计算投标并且重复这个过程。获胜机器人然后前往边界栅格开始新一轮的感知和地图创建-投标-移动循环。当没有新的边界栅格出现时, 所有机器人停止探测。

由于投标时间 t_{bid} 主要取决于感知和地图创建与移动的时间, 因此, 本文采用自适应投标时间 t_{bid} 参数设置, 即不同的探测阶段采用不同的投标时间。在探测初期, 由于每个机器人需要从 0 开始感知和地图创建, 而且未知边界栅格数较多增加了移动时间, 因此, 可以选择较大的投标时间, 在探测中期, 选择适中的投标时间, 在探测后期主要以地图更新为主, 且边界栅格趋于减少从而移动时间较少, 可以选择较小的投标时间, 以实现投标时间的自适应设置。

3.4 避碰协作

由于分布式投标算法中引入了接近度的概念, 从而使机器人之间保持相近的距离。然而, 通信网还是可能发生隔断的, 这是因为投标算法仅仅依据机器人位置的静态图进行决策, 而多机器人系统是高度动态的, 机器人的位置也是不断变化的。例如, 在某一瞬间, 某一机器人可能移出所有其他机器人的通信范围, 而成为与其他机器人隔断的孤智能体, 进而隔断了与其他机器人之间的信息交互。还有一种可能的情况是, 由于通信链接的中断, 形成了 2 个或多个子网。极端情况是, 被隔断的单一机器人作为一个子网。

通信网发生隔断时, 每一个子网内的投标受到限制, 导致不同子网的地图不一样。这可能引起下面的问题: 不同的机器人可能选择同一目标栅格, 或者一个机器人可能选择其他机器人已经存在其中的栅格作为目标。因此, 每个机器人应具备避碰能力。

针对上述问题, 本文设计出了如下避碰算法:

当机器人选定目标栅格后, (1)把所有机器人所选的目标栅格进行比较, 如果有相同的目标栅格, 则按优先级顺序进行, 优先级低的机器人必须等到优先级高的机器人离去后再前往目标栅格; (2)把机器人所选的目标栅格与所有机器人的位置进行比较, 如果存在机器人, 则等到机器人离去后, 再奔向目标栅格。

4 实验结果及分析

为了验证本文算法有效性, 在 PC 机上进行了仿真实验。实验参数设置如下: 探测环境为 20×20 的栅格, 如图 2 所示; 机器人的安全半径 $r = r_0 + 1 = 2$, 即为 2 个单元格, 感知半径为 4 个单元格(即 $r_s = 4$), 通信范围为 8 个单元格(即 $r_c = 8$); 解析式(2)中的权值 $\omega_1 = \omega_2 = 1.0$, $\omega_3 = 1.5$; 在探测初期, 投标时间 $t_{bid} = 1.5$ s, 在探测中期, 选择适中的投标时间 $t_{bid} = 1.0$ s, 在探测后期, 选择较小的投标时间 $t_{bid} = 0.6$ s。整个环境不再有未探测区域, 停止探测, 探测任务完成。图 5 给出了在恒定投标时间下考虑传感器的误差和机器人的实际尺寸(with size and uncertainty)的实验结果。从图 5 可以看出, 与不考虑传感器的误差和机器人的实际尺寸(without size and uncertainty)的探测时间相比, 没有明显的变化。然而, 图 6 的实验结果显示, 通过设置自适应投标时间可以大大减少探测时间。

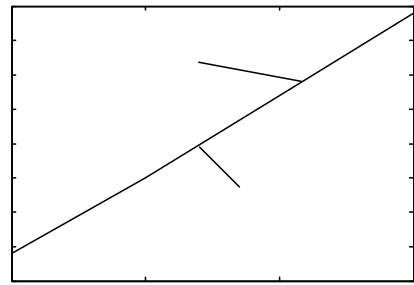


图 5 实验结果 1

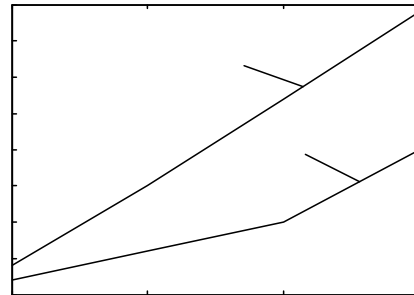


图 6 实验结果 2

5 结束语

通信和感知是多机器人系统协作问题的关键因素, 目前的研究大多假定通信范围是无限的, 感知是精确无误的, 然而, 实际情况并非如此, 许多研究在实际中的应用受到了限制。本文针对分布式多机器人协作避碰问题展开研究, 首先建立了多机器人探测模型, 然后提出了一种多机器人探测的避碰算法, 该算法综合考虑传感器的误差和机器人的实际尺寸, 增加了算法的实用性。仿真实验验证了算法的有效性。本文下一步将进行本文算法在真实环境下的机器人协作实验。

参考文献

- [1] Ishigami G. Path Planning for Planetary Exploration Rovers and Its Evaluation Based on Wheel Slip Dynamics[C]//Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation. Roma, Italy: [s. n.], 2007: 2361-2366.
- [2] Arai T. Editorial: Advances in Multi-robot Systems[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2002, 18(5): 655-661.
- [3] Yamauchi B. Frontier-based Exploration Using Multiple Robots[C]//Proc. of the 2nd International Conference on Autonomous Agents. New York, USA: [s. n.], 1998: 47-53.
- [4] Zlot R. Multi-robot Exploration Controlled by a Market Economy[C]//Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Washington D. C., USA: [s. n.], 2002: 3016-3023.
- [5] Simmons R. Coordination for Multi-robot Exploration and Mapping[C]//Proc. of the National Conference on Artificial Intelligence. [S. l.]: MIT Press, 2000: 852-858.
- [6] Sheng Weihua. Distributed Multi-robot Coordination in Area Exploration[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2006, 54(12): 945-955.

编辑 任吉慧