

基于 Petri 网的多机器人协作任务分配与导航研究

陈余庆*, 庄严, 王伟

(大连理工大学 电子与信息工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 研究了基于 Petri 网理论的多移动机器人任务分配和导航策略问题. 针对有限空间环境下的物料收集协作任务, 提出了一种机器人路径选择方法, 并建立了基本路口单元和工作空间的 Petri 网模型. 通过任务分配模型实时规划物料仓库内的机器人, 并对具有拐角特征的多机器人路径冲突给出了消解方法, 建立了机器人冲突协调模型. 通过分析任务冲突协调模型, 避免了多机器人运动路径冲突. 最后仿真实验验证了提出的多机器人任务规划方法的有效性.

关键词: 任务分配; 导航; Petri 网; 多移动机器人

中图分类号: TP24 **文献标志码:** A

0 引言

多移动机器人任务分配与导航方法研究是机器人协作的一项基本课题. 当给定多机器人系统某项任务时, 首要问题是如何组织多个机器人去完成任务, 如何将总体任务分配给各个成员机器人, 并实现机器人之间的有效合作^[1]. 以某种机制确定各成员机器人的任务关系, 必将有助于提高完成任务的效率和保证协作秩序^[2]. 本文着重研究多移动机器人的任务协调与规划问题, 对底层驱动和运动控制特性不做深入分析.

为了便于分析多移动机器人协作任务规划方法, Petri 网工具被引入并应用到机器人领域之中. Petri 网是最近发展起来的一种图形和数学建模工具^[3]. 经典 Petri 网由库所、变迁、有向弧和托肯(令牌)等元素构成^[4]. McCarragher 提出了一种基于 Petri 网络的控制方法^[5], 用于解决机器人装配建模、任务合成运动控制和轨迹规划问题. Cao 等描述了一种机器人任务序列规划框架, 它把任务分解为一系列操作来分步完成^[6]. 这些方法均主要应用于机器人的底层行为规划和控制操作. Montano 等应用定时 Petri 网处理单机器人的多个并发过程, 分析了机器人控制器的选择、确认和产生过程^[7]. Lima 等介绍了应用多种不同类

型的 Petri 网分别为不同任务建模的方法^[8]. 本文主要应用 Petri 网来解决在实时系统中, 机器人的通信受限和任务执行受资源环境等约束条件下的协作任务问题. 机器人相互之间不能够进行通信对话, 智能协作运动仅支持已知环境下的点到点导航和物料运输等工作.

1 物料收集协作任务模型

建立物料收集协作任务模型是实现机器人分工合作的基础. 目前, 工厂车间和地下矿井的物料收集工作主要由人工完成, 这是一件非常枯燥乏味的工作. 为此, 本文研究多移动机器人实现自主物料收集的协作规划策略. 系统控制对象为多台具有承载物料能力的自主导航车, 即移动机器人. 其工作环境为仓库、通道以及路口等共同组成的封闭车间区域, 物料生产车间的平面图如图 1 所示.

本文环境模型假设满足如下特征:

(1) 工作环境主要由路口单元和通道组成, 并具有惟一的物料仓库 2Q, 它与 0P 路口相连;

(2) 1W~4W 为 4 个物料生产车间, 物料从车间的拐角处向外输送;

(3) 路口之间以通道相互连接, 并且物料不

占用通道空间；

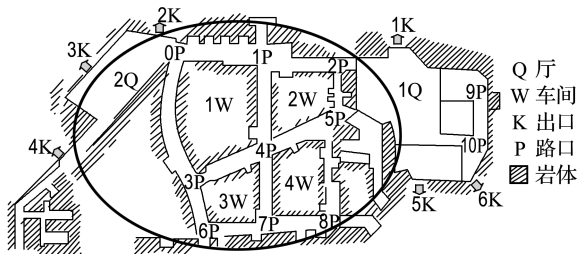


图 1 物料生产车间的平面图

Fig. 1 Material production workshop ichnography

- (4) 每条通道的宽度只能允许一个移动机器人通过；
- (5) 执行任务时，所有机器人运动速度相同且恒定；
- (6) 机器人在物料收集过程中不考虑工作机器人以外的其他障碍物。

车间或地下矿井环境复杂多样，但大多数环境可以简化为满足上面约束条件的工作环境模型。为了便于分析，工作区域可以被划分为多个基本单元进行处理。机器人可以把存有物料的路口作为运动目标位置，并把各个路口分别作为环境模型的基本单元。

根据环境模型假设(4)描述，环境模型中的通道在任一时刻只能表现出其中一条单行道的性质。当然，这需要有一个有效的路径冲突协调方法作为保证。本文把由路口和驶向此路口方向的通道所组成的基本单元称为“路口单元”，用符号 u 来表示。因此环境模型中，所有路口构成路口单元集合 $\{u_i\}, i = 0, 1, \dots, 8$ 。在物料收集过程中，移动机器人都是从“0”号路口单元出发，根据不同任务需求信息确定运动目标位置，并实时规划机器人运动路径，从而实现到目标路口单元收集物料和返回物料仓库任务。

机器人到达目标位置的路径不是惟一的，在本文的任务模型中，机器人实时规划当前运动路径，因此机器人的路径选择过程可以转化为当前所在路口到目标路口的路径规划问题。

2 Petri 网环境模型

建立机器人的路口单元 Petri 网模型，需要已知移动机器人的当前运动状态和行为等信息。网络系统资源包括路口和通道，机器人状态包括

路径选择、运动两种状态，机器人行为包括定位和转向等。

根据 P/T 网的特点，如果将整个工作环境模型完整地用 Petri 网表达出来，那么将会得到一个非常庞大而复杂的 Petri 网系统^[9]。为便于分析，首先只对其中的一个基本单元建立 Petri 网，这样对整个系统的正确性不会有任何影响。因此，以常用四通道基本路口单元为建模对象，用库所/变迁网描述的路口单元模型如图 2 所示。

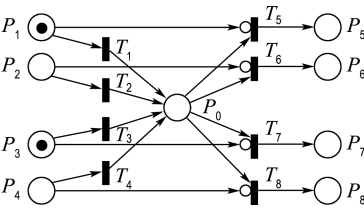


图 2 四通道路口单元模型

Fig. 2 Model of four path crossing unit

其中“库所” P 表示两类系统资源，“变迁” T 表示移动机器人的基本行为。库所 P_0 表示一个具有 4 个连接通道的路口，库所 $P_1 \sim P_4$ 分别表示该路口单元东侧、南侧、西侧和北侧的“单行道”，而库所 $P_5 \sim P_8$ 则分别为与该路口相邻的其他路口单元的库所，例如 P_5 为该路口东侧的路口单元的西侧“单行道”。变迁 $T_1 \sim T_4$ 分别表示移动机器人到达路口的定位动作。 $T_5 \sim T_8$ 分别表示移动机器人向不同方向前进。“ $\text{---} \bigcirc \text{---}$ ”表示抑制弧，并且只要与抑制弧尾部相连的库所中有托肯，则与其小圆圈处相连的变迁就不会被激发。值得注意的是以上各路口单元库所中最多容纳一个托肯。

在图 2 中，库所 P_1 和 P_3 中存在托肯。在本文机器人任务分配和规划系统中，托肯表示资源占有者，因此当前指定路口的东西两侧单行道上分别有机器人存在。机器人通过定位操作，使其运动趋向于当前路口方向。当托肯处于 P_0 时，说明移动机器人在路口处，并处于“路径选择”状态；而当托肯处于其他库所中时，说明移动机器人在相应的通道上，且处于“运动”状态。通过路径选择算法，机器人获得到达准确目标位置的运动方向，然后转移到下一单元路口对应的通道($P_5 \sim P_8$)上。由于库所 P_0 容量为 1，不会出现多个托肯同时占用 P_0 现象。这样，整个工作空间可以以路口

单元为基本单位进行划分,并用 Petri 网来协调规划系统运动状态.

在图 3 中,带有整数标号的圆表示路口单元及其标号,有向箭头表示路口单元之间的连接通道库所,而库所 P 的定义与图 2 中的库所定义相同. 因此以路口单元为基本单位,工作空间整体结构可以由 Petri 网工具来描述. 各路口单元之间是以通道库所来进行连接的. 对于两个任意相邻路口单元,其连接通道相同,但是对于不同的路口单元来说,在 Petri 网模型中其库所是不同的. 例如,1 号和 4 号路口单元之间的通道在 1 号路口单元中为库所 P_2 ,而在 4 号单元中为库所 P_4 . 同时,每个路口单元拥有通道库所的个数不一定是相同的,但路口单元之间总会有通道库所实现相互连接.

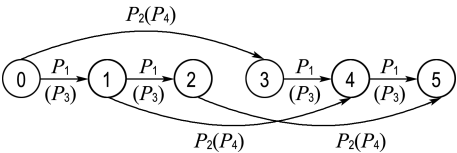


图 3 工作空间 Petri 网环境模型

Fig. 3 Petri net circumstance model of workshop

3 多机器人导航资源冲突关系的解决方法

多移动机器人协作,首先需要解决并行工作的系统资源冲突,避免发生碰撞和路径“死锁”等问题. 移动机器人的运动路径冲突是多机器人协调控制中特有的复杂问题. 它是指当多于一台移动机器人在执行物料收集任务时,在给定环境下发生的多个移动机器人争用同一个路口或通道空间资源的现象. 在本文假设的工作环境中,通道托肯的容量是没有限制的. 但当多个机器人在同一通道资源内发生相向运动时,机器人相互之间会发生路径冲突. 冲突可能有多种情况,但类型具有相似性,本文分析了拐角特征路径和路口冲突问题.

具有拐角特征的路口单元通常具有两条单行道,当某移动机器人沿着一条单行道驶向该路口,而在其另一条单行道上同时有多个移动机器人正向往该路口驶来时,则会发生拐角路径冲突. 以图 4(a)所示的拐角特征环境为例, R_0 、 R_1 和 R_2 同时

向路口 P_k 运动. 如果机器人 R_1 先到达路口后,通道 P_j 和 P_i 仍分别有机器人 R_0 和 R_2 向路口驶来,上面的双机器人冲突调节方法不再适用. 为了避免碰撞发生,在具有拐角特征的路口单元处,首先判断该路口单元的另一个单行道上是否存在多个移动机器人,并驶向该路口. 在存在这种运动状态的情况下改变机器人前进方向,从而避免拐角特征环境下的多机器人碰撞冲突发生.

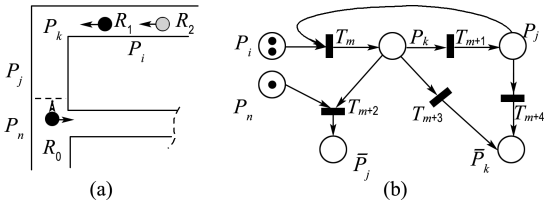


图 4 拐角特征环境下路径冲突(a)和拐角特征环境冲突解决模型(b)

Fig. 4 Path collision at corner (a) and collision avoidance Petri net model (b)

在拐角特征的冲突解决模型(见图 4(b))中,库所 P_i 中有两个托肯 a 和 b ,库所 P_n 中有一个托肯 c . 变迁 T_m 为占用拐角路口行为. 库所 P_i 中的托肯 a 在变迁 T_m 的激励下,首先占用库所 P_k . 并在变迁 T_{m+1} 激励下继续向库所 P_j 运动,同时激发库所 P_i 中的另一个托肯 b 占用 P_k ,并根据托肯 a 的当前状态而选择被 T_{m+3} 或 T_{m+1} 激励. 同时,托肯 a 在 T_{m+4} 激励下选择除了库所 P_k 之外的其他库所 $\bar{P}_k$. 与 P_j 相连的另一个库所 P_n 中托肯 c 在变迁 T_{m+2} 的激励下,选择除了库所 P_j 之外的其他库所 $\bar{P}_j$,避免冲突发生.

路口不同于通道,它在任一时刻的托肯容量都为 1,即多个机器人不能同时占用同一个路口资源. 因此当有多个机器人同时到达同一路口时,会发生路口资源冲突. 为说明这种状态,下面分析一个“全堵塞”状况,即路口处通道数与冲突机器人数量相同时出现的“死锁”现象,如图 5 所示. 为了解决路口冲突问题,在资源冲突解决模型里需要引入“等待”、“回退”等基本行为. 机器人可能以 P_i 为其目标路口,也可能路过 P_i 到其他路口单元. 在图 5 中,当机器人 R_0 和 R_1 同时到达路口 P_i ,并且准备通过 P_i 继续向下一路口单元运动时,则标号小的机器人先通过当前路口. 当某机器人 R_0 以 P_i 为目标路口,则机器人 R_1 先通过目标

路口,而后机器人 R_0 占用 P_i ,即所谓“路过先行,小号占优”原则。

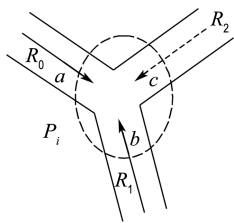


图5 路口冲突示意图

Fig. 5 Abstract view of crossing collision

当3个通道同时有机器人到达路口单元时,按前面的冲突解决原则,就会出现“死锁”问题。为此,针对这种特殊状态,采用部分机器人回退到上一路口和通道方法来解决冲突。回退机器人仍然可以依据“路过先行,小号占优”原则,将最后通过路口机器人作为回退机器人,采取回退避让措施。以 a 通道机器人 R_0 和 b 通道机器人 R_1 要通过路口,而 c 通道机器人 R_2 目标路口为 P_i 为例,其 Petri 网路口冲突解决模型如图6所示。 T_m 激发“等待”操作, T_{m+1} 激发“占用”操作, T_{m+2} 激发“回退”操作。在上面的协调模型控制下,机器人 R_2 回退避让, a 通道的机器人 R_0 首先占用该路口 P_i ,并由 T_{m+3} 激发进入 c 通道。而后 b 通道等待机器人 R_1 被激发占用路口 P_i ,并根据其目标路口选择进入 a 通道或 c 通道。同时回退机器人 R_2 根据当前所在通道和路口重新分配到路口 P_i 的任务。

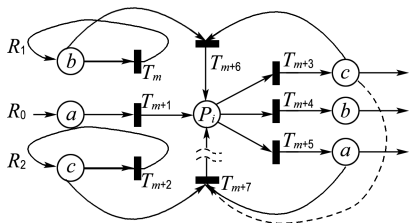


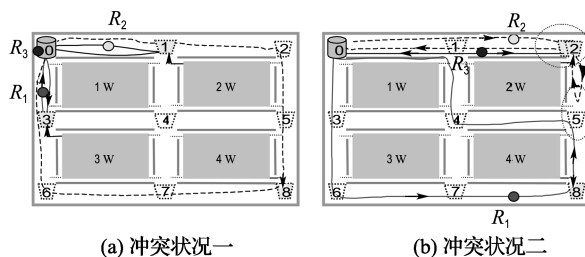
图6 三机器人路口冲突解决模型

Fig. 6 Collision avoidance model at crossing of three robots

4 仿真结果

为了验证本文提出的基于 Petri 网的机器人协作任务分配与导航方法在实际应用中的有效性,在 Turbo-C 环境下仿真设计了多组不同运动状态下的协作物料收集实验。在实验中,以3台自主移动机器人 R_1 、 R_2 和 R_3 作为被控对象,物料收

集工作环境如图1所示。在环境模型中,物料被堆放在路口处,用带阴影的路口符号表示,因此机器人把存有物料的路口作为运动目标位置。限于篇幅,本文以典型的拐角特征环境下(冲突状况一)和一个非拐角特征环境下(冲突状况二)的3个机器人路径冲突为例,来说明本文的路径冲突解决策略。下面两组实验结果分别记录了不同状态下的机器人 R_1 、 R_2 和 R_3 执行任务路径。



(a) 冲突状况一

(b) 冲突状况二

图7 三机器人路径冲突协调

Fig. 7 Path collision avoidance for three robots

实际任务环境中,机器人在拐角特征环境下易于发生路径冲突。图7(a)为在0号路口单元出现三机器人冲突的情况。机器人 R_1 和机器人 R_2 在完成3号和1号路口单元的物料收集任务并返回过程中,系统出现另一个待分配任务,此时虽然仍有空闲机器人 R_3 未分配任何任务,但机器人 R_3 受限与通道资源被占用,因此在接到任务后不能立即执行任务。这种任务冲突通常需要等待空闲通道资源,在其他机器人返回到物料仓库后系统不会重新分配任务,仍由机器人 R_3 完成已分配任务。图7(b)为2号路口单元同时存在两个物料收集任务,而8号路口单元存在一个物料收集任务。机器人 R_2 先到达2号路口单元后,为了避免和机器人 R_3 的到来发生冲突,机器人 R_2 选择向5号路口单元行进。此时机器人 R_1 完成了8号路口单元的物料收集任务并到达5号路口单元,机器人 R_1 为了避免与机器人 R_2 相撞,放弃了2号路口单元并经4号路口单元返回物料仓库。同样,机器人 R_3 完成2号路口单元的任务后,直接原路返回,此时机器人 R_2 在机器人 R_1 离开5号路口单元后到达5号路口单元,经路径选择算法计算在已不存在冲突的情况下,经2号路口返回到物料仓库。2号和4号路口单元的两次路径冲突的解决也说明了本文冲突消解模型的有效性。

5 结 语

本文研究了在满足一定约束的环境模型中,多移动机器人协作完成物料收集的任务分配和导航策略问题.移动机器人采用点到点的运动控制模式,实现实时任务的协调与规划.本文首先提出了一种单机器人路径选择方法,并基于 Petri 网理论建立了基本路口单元模型和工作空间 Petri 网模型.针对多机器人资源环境中存在的冲突问题,分析了机器人运动路径冲突消解方法.下一步工作重点是分析不同类型的环境模型,并利用有色 Petri 网的建模方法简化复杂的网络模型,建立复杂任务系统的 Petri 网模型.

参考文献:

[1] FARINELLI A, IOCCHI L, NARDI D. Task assignment with dynamic perception and constrained tasks in a multi-robot system [C] // **IEEE International Conference on Robotics and Automation**. Piscattway: IEEE, 2005:1523-1528

[2] 宋梅萍,顾国昌,张汝波. 多移动机器人协作任务的分布式控制系统[J]. 机器人, 2003, **25**(5):456-460

[3] 陈仁际. 基于行为的多机器人系统协调理论及实现研究[D]. 上海:上海交通大学, 2001

[4] 袁崇义. Petri 网原理与应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2005

[5] MCCARRAGHER B. Petri net modeling and trajectory planning of robotic assembly tasks [J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 1994, **41**:631-640

[6] CAO T H, SANDERSON A C. Task decomposition and analysis of robotic assembly task plans using Petri nets [J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 1994, **41**:620-630

[7] MONTANO L, GARCIA F, VILLARROEL J. Using the time Petri net formalism for specification, validation, and code generation in robot-control applications [J]. **International Journal of Robotics Research**, 2000, **19**(1):59-76

[8] LIMA P, GRACIO H, VEIGA V, *et al.* Petri nets for modeling and coordination of robotic tasks [C] // **IEEE International Conference on Systems, Man, Cybernetics**. San Diego:IEEE, 1998:190-195

[9] RESIG W. Petri nets-an introduction [M] // **Springer EATCS Monographs in Theoretical Computer Science**. Berlin:Springer-Verlag, 1985

Research on tasks assignment and navigation
of multiple mobile robots based on Petri net

CHEN Yu-qing*, ZHUANG Yan, WANG Wei

(School of Electronic and Information Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The task assignment and navigation method of multiple mobile robots based on Petri net theory are investigated. A robot routing method is presented for the task of materials collection in a constraint space. Also, the Petri net models for path crossing and the whole workshop circumstance are constructed. So the robots in storehouse are scheduled real-time by task assignment model, and the collision among robots in the corner can be avoided. The collision avoidance models of task are constructed and analyzed. Simulation verification is realized for the presented tasks scheduling method of multi-robot system.

Key words: task assignment; navigation; Petri net; multiple mobile robots