

文章编号:1005-0523(2012)04-0024-05

多机器人系统连通性主动控制研究

王晓明¹, 江慧²

(1. 华东交通大学轨道交通学院, 江西 南昌 330013; 2. 上海师范大学信息与机电工程学院, 上海 200234)

摘要:对于分布式多机器人系统,保持通讯的连通性是非常重要的。本文提出了一种无线传感器网络环境下多机器人系统建立连通性的算法,解决了初始状态不连通的多机器人系统如何通过无线传感器网络建立连通关系,最后形成直接连通的多机器人网络。仿真结果表明算法高效可靠,适用于复杂环境下多机器人自主组网。

关键词:多机器人系统;通讯连通性;最短路径

中图分类号:TP242.6

文献标志码:A

多机器人系统在民用、军事和航空领域均有着非常广阔的应用前景,由于其分布式的特点、可以提高任务完成的效率,并可以完成许多单机器人不能胜任的任务。将传感器网络引入多机器人系统是近年来的一个重要研究趋势。无线传感器网络使得多机器人系统具有更强的感知能力和信息传输交互能力。在多机器人系统中保持通讯连通是非常重要的,很多应用场景中,保证多机器人处于连通状态是上层应用成为可能的先决条件。

许多研究表明^[1]即使少量的数据通讯也可以在特定任务中显著提高多机器人的性能。近年来,关于保持多机器人系统的连通性逐渐成为多机器人研究领域中的热点问题。为了确保多机器人系统的连通性,国内外学者进行了相应的研究。樊玮虹等^[2]研究了如何在网络的自组织过程中保证每个移动节点(机器人)与整个网络之间的连通性。文献[3]研究了群体保持连通性方法,采用一种势场函数来保持个体间的连通性,用来解决群集控制问题。Zavlanos等^[4]利用Laplacian矩阵谱特性,结合光滑势场梯度实现了连通性的保持,给出的控制律可以实现多智能体系统的避碰和目标跟踪。文献[5]研究了一种检验一组机器人是否为双连通的分布式算法,提供了一种动态加入/移除机器人而保持系统双连通的分布式算法。文献[6]考虑到多智能体在运动过程中始终保持网络的连通,研究了一种分布式反馈和可验证的控制框架。

从以上分析可知,国内外对多机器人连通性的研究主要集中在保持通讯连通方面,对无线传感器网络环境下非连通的多机器人系统如何建立连通研究较少。本文研究无线传感器网络环境下多机器人系统如何建立连通性的算法,解决了初始状态不连通的多机器人系统通过无线传感器网络建立连通关系,最后形成直接连通的多机器人网络。

1 基本定义

假设机器人上都带有无线传感器网络节点作为通讯模块,环境中布置了覆盖度大于1的无线传感器网络,通讯范围内的机器人能相互通讯,并能和无线传感器网络进行通讯,所有通讯节点都能检测接收信号强度(RSSI)。

收稿日期:2012-07-07

基金项目:华东交通大学科研课题(09111118)

作者简介:王晓明(1978—),男,讲师,博士研究生,研究方向为多机器人系统控制。

定义1 当两节点之间信号强度大于一个给定的阈值时,两节点之间能进行稳定安全的通讯,这时我们说两节点是连通的。

定义2 为了方便研究多机器人系统的连通性,我们把无线传感器网络节点和机器人节点组成的网络抽象为无向加权图^[7](Weighted Graph) $G=(V, E)$, 或者叫无向网 undirected net, 其中 V 表示节点集合, E 表示边的集合, E 中每个元素包含3个分量:边的两个节点和权值,用权值 Weight 表示两个节点间的距离。边 $e=(u, v, \text{weight}) \in E$ 当且仅当 Weight 小于一定的距离,确保节点 u 和节点 v 能相互安全通信。

由所有机器人节点组成的集合 $V_r \subseteq V$, 对于 V_r 中的任意两个点 u 和 v , 只要 $(u, v, \text{weight}) \in E$, 一定有 $(u, v, \text{weight}) \in E_r$, 则图 $Gr(V_r, E_r)$ 为由多机器人组成的顶点集 V_r 诱导的 G 的子图。由无线传感器网络节点组成的图 $G_s = G - Gr$ 。

定义3 无向加权图的邻接矩阵表示:设图 $G=(V, E)$ 有 n 个节点,则图可以表示为一个记录各点信息的数组和一个 $n \times n$ 的二维数组。

图1(a)给出了一个无向加权图,图1(b)为顶点信息数组,图1(c)为对应的邻接矩阵,R1~R6为机器人节点编号。

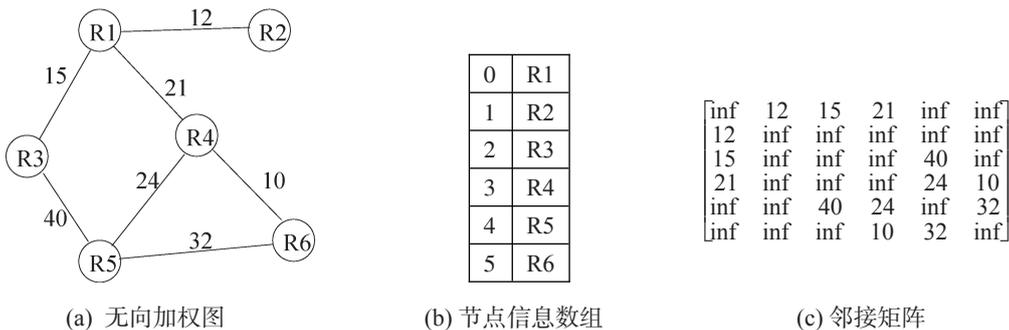


图1 无向加权图邻接矩阵
Fig.1 Adjacency matrix of undirected weighted graph

2 算法描述

在实际应用中,多机器人的初始状态并不一定是连通的,可能会形成多个连通子网。例如,在救灾现场,机器人被空投到指定环境中,由于存在撒布不均匀的情况,多机器人系统不一定是连通的,如果同时撒布一些价格低廉的无线传感器网络节点,辅助多机器人系统组成连通网络,将有助于提高多机器人系统的工作能力和运行效率,如图2所示。

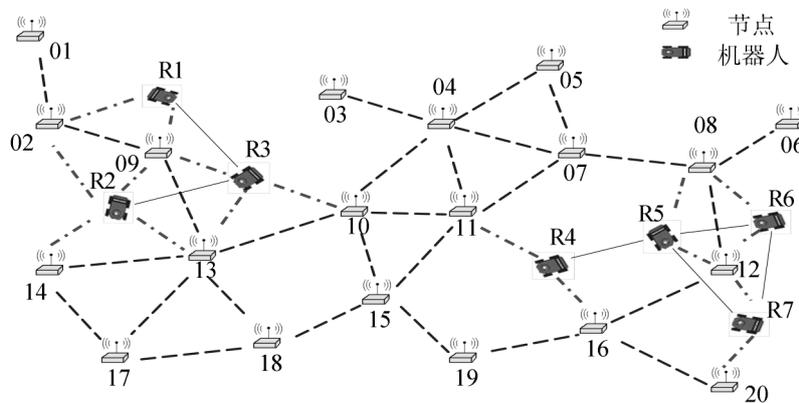


图2 随机撒布的机器人及无线传感器网络节点连通图
Fig.2 Connected graph of random-spread robots and wireless sensor network nodes

图中, $G=(V, E)$, 顶点集 $V= \{01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08, 09, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7\}$; 边集 $E= \{(01, 02, 21), (02, R1, 18), (02, 09, 19), (02, R2, 21), (R1, 09, 11), (R1, R3, 18), (09, R2, 11), (09, 13, 24), (09, R3, 12), (R2, 14, 16), (R2, 13, 15), (R2, R3, 21), (14, 13, 28), (14, 17, 23), (17, 13, 24), (17, 18, 26), (13, R3, 21), (13, 10, 29), (13, 18, 19), (R3, 10, 17), (18, 15, 16), (03, 04, 17), (04, 05, 21), (04, 07, 22), (04, 11, 18), (04, 10, 22), (05, 07, 19), (10, 15, 16), (10, 11, 15), (15, 11, 22), (15, 19, 18), (11, 07, 24), (11, R4, 17), (19, 16, 24), (07, 08, 23), (08, 06, 14), (08, R5, 14), (08, 12, 24), (08, R6, 15), (R4, R5, 18), (R4, 16, 14), (R5, R6, 16), (R5, 12, 13), (R5, R7, 25), (16, 12, 25), (16, 20, 26), (12, R6, 13), (12, R7, 12), (R6, R7, 21), (R7, 20, 16)\}$ 。

多机器人系统通过无线传感器网络连通后,如何形成直接连通网络并保持连通也是有必要的。本文研究多机器人系统通过无线传感器网络构建虚拟领导者,建立连通网络,最终形成直接连通网络的算法。

2.1 求解多机器人的连通子图

算法首先要找出图 G 中由机器人组成的子图 Gr , 并计算出 Gr 中包含多少个不直接连通的机器人子图。由于在节点信息数组中,机器人的ID是以“R”开头,可以构成多机器人顶点集 $Vr \subseteq V$, 并可由 Vr 诱导出 G 的子图 $Gr(Vr, Er)$ 。

根据 Gr , 可以计算出连通子图的数目和各机器人在哪个连通子图,具体算法流程如下:

Algorithm 1: G 图的连通性计算

Input: Gr 图的邻接矩阵

Output: 各个连通子图的邻接矩阵

begin

for $i=1 : n-1$

for $j=(i+1) : n$

if $e_{ij} > 0$ // $e_{ij} > 0$ // 表示 $Vr(i)$ 和 $Vr(j)$ 两者有边

if $Q(i) == 0 || Q(j) == 0$ // $Vr(i)$ 或 $Vr(j)$ 没有被标记子网号
// 标记为相同子网号

else if $Q(i) < Q(j)$ // $Vr(i)$ 和 $Vr(j)$ 被标记为不同子网号

$Q(i) = Q(j)$ // 合并子网

end if

end if

end for

end for

end

2.2 求两个子图间最短路径算法

为了在不同机器人子网之间建立连通,并在合适的位置建立虚拟领导者,需要求出机器人子网间的最短路径,这是一个多源多目标问题。而传统的Dijkstra算法^[8]主要针对单源的最短路径问题进行求解。Floyd算法^[9]用来求解所有顶点之间的最短路径,算法的时间复杂度为 $O(n^3)$ 。本文轮流采用一个已知机器人子网的顶点作为源点,另一个机器人子网的顶点作为目标顶点,重复执行Dijkstra算法,求出每一对顶点到另一个子网的最短路径,最后对各源点到另一个子网的最短路径进行比较,可求出两个子网间的最短路径。具体算法流程如下:

Algorithm 2: 两个子网间的最短路径求解算法

Input: G 图的邻接矩阵,两个子网的节点信息数组 Sub Gr 1 和 Sub Gr 2

Output: 最短路径和路径长度

begin

foreach $Vr(i)$ in sub Gr 1

```

foreach Vr(j) in sub Gr 2
    shortestlength=Dijkstra(Vr(i), Vr(j)); //采用Dijkstra算法求解Vr(i)到Vr(j)之间的最短路径
    shortestlength=Min(shortestLength, lastLength) //和上次求解的最短路径进行比较,保留路径长度较短的路径
end foreach
end foreach
end
    
```

3 仿真实验结果

本文采用 matlab 仿真对算法进行验证,在算法 1 中输入图 2 产生的邻接矩阵,计算出图中由机器人节点组成的连通子网,求出的各机器人连通子图的节点信息数组和邻接矩阵如图 3 所示。

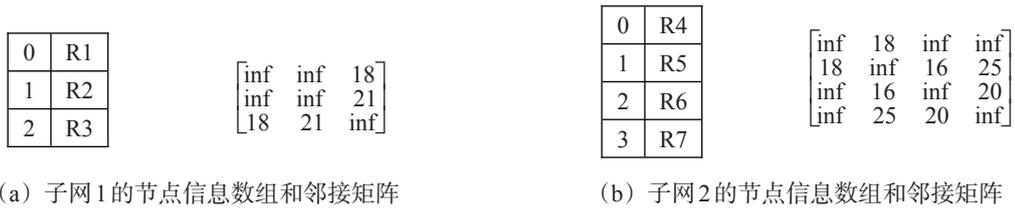


图3 机器人连通子图的节点信息数组和邻接矩阵
Fig.3 Information array and adjacency matrix of connected subnet

根据算法 1 计算出的结果,作为算法 2 的输入,通过改进的 Dijkstra 算法,求出的两个机器人子网之间的最短路径为(R3, 10, 11, R4),最短路径长度为 49,计算耗时 0.117 188 s。

求出最短路径后,设置路径中无线传感器网络节点为虚拟领导者,诱导不同机器人子网相互靠近,最终可以形成直接连通的机器人网络,如图 4 所示。

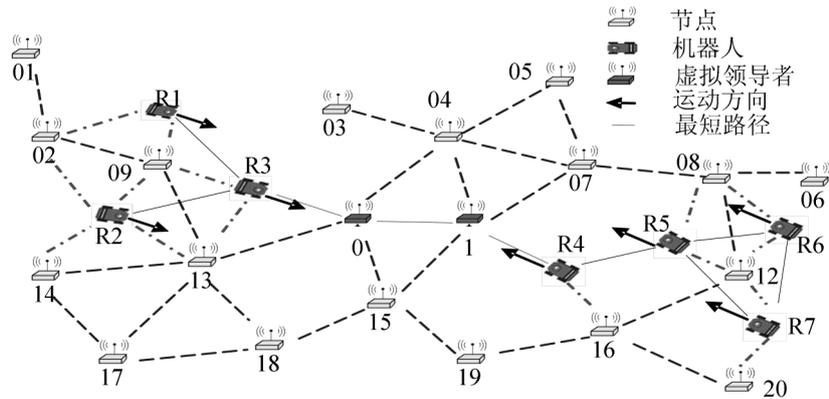


图4 直接连通的机器人网络形成过程图
Fig.4 Formation process of direct connected multi-robot network

4 结论

仿真实验结果表明:算法 1 可以快速在由机器人节点和无线传感器网络节点组成的环境中快速计算出机器人连通子网,算法 2 通过改进 Dijkstra 算法,高效计算出不同连通子网间的最短路径,并将最短路径中的无线传感器网络节点设置为虚拟领导者,诱导不同机器人子网相互靠近,最终可以形成直接连通的机器人网络,为下一步研究多机器人协作控制提供必要的通讯保证。

参考文献:

- [1] BALCH T R, ARKIN R C. Communication in reactive multi-agent robotic system[J]. *Autonomous Robots*, 1994, 1(1): 27-52.
- [2] 樊玮虹, 刘云辉, 周东翔, 等. 基于机器人群的主动传感器网络自组织的运动规划[J]. *自动化学报*, 2010, 36(10): 1409-1416.
- [3] ZAVLANOS M M, PAPPAS G J. Potential fields for maintaining connectivity of mobile networks[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2007, 23(4): 812-816.
- [4] ZAVLANOS M, JADBABAIE A, PAPPAS G J. Flocking while preserving network connectivity[C]//Proc. of the 46th IEEE Conference on Decision and Control, New Orleans, LA, USA, 2007: 2919-2923.
- [5] AHMADI M, STONE P. Keeping in touch: Maintaining biconnected structure by homogeneous robots[C]//21st National Conference on Artificial Intelligence and the 18th Innovative Applications of Artificial Intelligence Conference, 2006: 580-585.
- [6] ZAVLANOS M M, PAPPAS G J. Distributed connectivity control of mobile networks[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2008, 24(6): 1416-1428.
- [7] 徐保根, 罗茜, 丁宗鹏, 等. 关于图的集控制数[J]. *华东交通大学学报*, 2011, 28(5): 1-4.
- [8] 乐阳, 龚健雅. Dijkstra 最短路径算法的一种高效率实现[J]. *武汉测绘科技大学学报*, 1999, 24(3): 209-212.
- [9] 石为人, 王楷. 基于 Floyd 算法的移动机器人最短路径规划研究[J]. *仪器仪表学报*, 2009, 30(10): 2088-2092.

Research on Active Control of Multi-robot System Connectivity

Wang Xiaoming¹, Jiang Hui²

(1. School of Railway Tracks and Transportation, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. College of Information, Mechanical and Electronic Engineering, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China)

Abstract: It is very important to maintain communicative connectivity for distributed multi-robot system. This paper proposed an algorithm for establishing connectivity of the multi-robot system in wireless sensor networks, which solved the problem concerning how to establish connectivity through wireless sensor networks for the multi-robot system whose initial state was not connected, and thus formed a direct connected multi-robot network. Simulation results showed that the algorithm was efficient and reliable, which made it applicable for multi-robot to establish connectivity autonomously in complex environments.

Key words: multi-robot system; communicative connectivity; the shortest path