

分布式多机器人通信仿真系统

蔡自兴,任孝平,邹磊

(中南大学信息科学与工程学院,湖南长沙410075)

摘要:针对目前多机器人通信仿真系统较少的问题,进行了多机器人通信仿真系统的设计研究.提出的多移动机器人通信仿真系统设计方案,侧重于反映通信网络的拓扑变化情况,以及多个机器人之间是如何进行通信的.仿真系统预留了机器人控制算法的接口,便于结合机器人避碰、任务分配、连通覆盖等进行综合研究.多机器人覆盖研究是目前多移动机器人和无线传感器网络中的一个研究热点,针对这个问题,采用了虚拟力分配策略,使得多机器人在保持连通性的同时尽可能大地覆盖某一区域,最后以六边形覆盖为约束条件进行了区域覆盖,并实现了该仿真系统的原型.实验表明,该仿真系统能准确地模拟多机器人在保持相互通信的情况下,达到最大化的区域覆盖.证实了基于虚拟力覆盖策略的有效性.

关键词:多机器人系统;仿真系统;通信网络;连通覆盖;虚拟力

中图分类号:TP393.01 **文献标识码:**A **文章编号:**1673-4785(2009)04-0309-05

A simulated communications system for distributed multi-robots

CAI Zi-xing, REN Xiao-ping, ZOU Lei

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: An architecture for simulating a communication system for multi-robots was developed and tested. The proposed system primarily reflects changes in the communication modes of robots and the topology of their communication network. A modularized design technology was adopted. Some interfaces were reserved in advance for research in areas such as robot avoidance, task distribution and coverage connectivity, and so on. At present, multi-robots coverage is a research hotspot in the field of multiple mobile robots and wireless sensor networks. We developed a special strategy to allocate robots using virtual forces among them; the robots would then cover the monitored area as much as possible. It has been proven that a regular hexagon provides maximum coverage with least waste; this was the basis of our approach. Experiments showed that this distributed algorithm moved robots to extend their coverage by the virtual force among robots while maintaining network connectivity. This proves the effectiveness of the virtual force coverage strategy.

Keywords: multi-robots system; simulation system; communication network; coverage connectivity; virtual force

随着任务的复杂化,单个机器人执行任务的缺点越来越明显,有些任务对单个机器人来说是很难或无法完成的,而采用多机器人团队协作完成任务是一个较好的选择^[1].多机器人在协作完成一项任务时,需要相互的信息融合和共享,因此通信是必不可少

的^[2].除了经典的 CEBOT、ACTRESS 系统,各研究机构提出了很多的多机器人系统平台,如: Cougar^[3]、MinDART^[4]、CoCoA^[5]等.目前对多移动机器人通信的研究已取得了一定的进展,研究内容主要包括:多移动机器人通信方式、多移动机器人通信语言、多移动机器人通信网络拓扑结构、多移动机器人通信协议、基于多移动机器人通信的应用研究等.然而目前的多机器人通信技术远未成熟,还需要进行大量的实验以实现在不可靠环境中机器人的可靠通信.机器人一般较为昂贵,直接在实体上进行控制

收稿日期:2009-05-12.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(90820302,60805027);国家博士点基金资助项目(200805330005);湖南省院士基金资助项目(2009FJ4030);质检公益行业科研专项项目(20081002).

通信作者:任孝平. E-mail: xiaopingren@gmail.com.

算法、协助策略和通信测试的实验投资较大. 算法的合理性、有效性可以通过计算机仿真进行初步验证, 然后再通过实际的多机器人系统进行实验验证, 因此有必要建立多机器人仿真系统用来对相关的算法进行计算机仿真验证^[1]. 当前几种典型的仿真系统有 CMU 和 Georgia Institute of Technology 共同开发的 TeamBot 系统^[6]; 专用于机器人足球的 Soccer Server 软件^[7]; Georgia Institute of Technology 计算学院的 MissionLab 系统^[8].

上述这些多机器人仿真系统, 着重研究的是多目标观测、未知环境探测、地图构建、路径规划、机器人足球、群体搬运等问题^[8-9]. 在对多机器人通信系统仿真研究方面相对较少. 虽然有很多针对通信协议仿真的工具如 NS2、OPENT 等, 然而学习仿真工具本身就是一个较难的过程, 更难以结合机器人避碰、任务分配等进行综合研究. 本文提出的多移动机器人通信仿真系统, 侧重于反映多个机器人之间的通信机制以及通信网络拓扑变化情况, 并预留了机器人控制算法的接口, 便于扩展进行综合研究. 最后以多机器人连通覆盖的研究背景实现了该仿真系统的原型.

1 多机器人通信网络仿真系统

多机器人团队在一个未知区域内执行任务, 相互之间通过通信网络进行信息的传递和共享. 根据多机器人环境下的通信网络的需求, 通信网络仿真系统由如图 1 所示几个模块组成, 其中的虚线框是预留的接口.

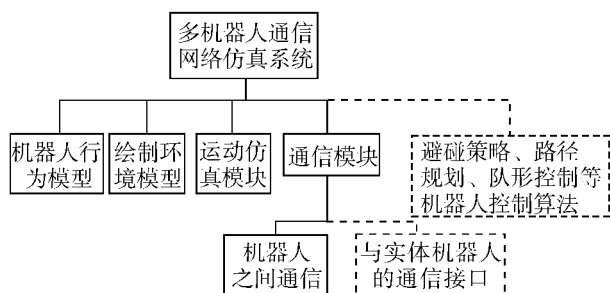


图1 多机器人通信仿真系统结构

Fig. 1 Structure of communication stimulation system

1.1 机器人行为模型

机器人行为模型主要包括机器人的分布、运动速率、运动规律等, 用于描述机器人的运动情况^[9]. 采用合适的行为模型对于分析机器人通信性能和运动规律具有重要的意义^[10].

考虑一个由 N 个随机分布的机器人形成的通

信网络, R_i 表示第 i 个机器人, 相应的机器人集合为 $R = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}$, $|R| = N$. R_i 位于一个方形观察区域 A 内. 开始时, 机器人 R_i 在仿真区域 A 内随机选择一个目的点 D , 然后机器人 R_i 选择以满足在 $[0, v_{\max}]$ 内均匀分布的某个速度 v_i 移动到目的点 D 后, 停留 t_i (用 t_i 表示机器人移动的剧烈程度, $t_i = 0$ 表示机器人是连续移动的). 机器人 R_i 的移动速率 v_i 和移动方向 θ_i 的选择与机器人 R_j ($i \neq j$) 不相关. 停留时间结束后, 机器人 R_i 又随机选择另一个目的点 D 并向其运动.

在该种模型中, 如果 v_{\max} 小而 t_i 长, 则通信网络的拓扑相对稳定; 如果 v_{\max} 大而 t_i 短, 通信网络的拓扑则有较高动态性. 使用该模型的网络链路存活时间较长, 易于形成稳定的拓扑.

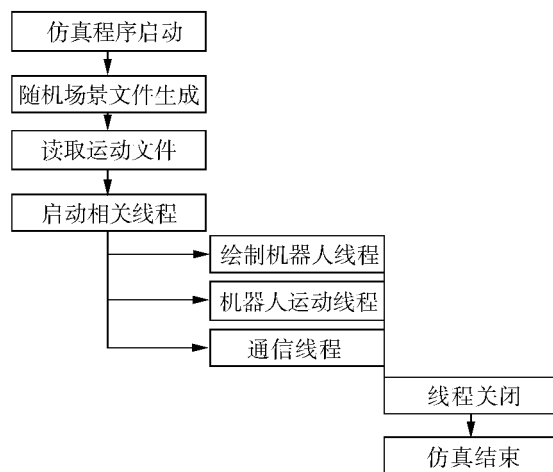


图2 多线程启动示意图

Fig. 2 Main threads in system

1.2 运动仿真模块

机器人行为模型建立之后, 接下来就是机器人动态过程的模拟. 如图 2 所示, 运动仿真模块主要有 2 个线程. 其中绘制机器人线程是根据机器人当前的坐标绘制新机器人线程; 机器人运动线程是不断改变机器人运动轨迹的线程, 包括机器人运动速度 v_i 以及移动方向 θ_i , 它将改变了的机器人坐标存入 RobotState 数据结构中. RobotState 用于存储机器人的全局运动状态以及环境信息.

1.3 通信模块

通信模块是该仿真系统的核心. 机器人需要发送信息的时候它就可以立即发送; 如果要完成较远距离的通信, 则可以通过中间机器人进行信息转发; 在某个移动机器人脱离通信范围的情况下, 其余机器人应该能够自适应地重新组成新的网络, 而不影响整个团队的工作.

1.3.1 相关概念

首先给出一些定义^[11], 机器人用 $R_i (i = 1, 2, \dots, j, n)$ 表示。

定义1 链路状态. 链路状态包括单向和双向, 分别记为 λ 和 $\bar{\omega}$ 链路. 文中采用同构机器人, 故建立的通信链路均为双向链路。

定义2 组长. 组长管理着它附近的机器人, 如图3中的 R_A 和 R_B . 组长的推选依据一定的算法, 未能充当组长的机器人还有2种状态: 组员和未定状态. 规定组长、组员、未定状态分别为 α 、 β 、 γ 状态。

定义3 组结构. α 状态 R_i 和 β 状态 R_j 组成的组结构称为 $A\{R_i, R_j\}$. 规定: 在一个组结构 A 中, α 状态 R_i 到 A 中 R_j 都有一条 $\bar{\omega}$ 链路. 如图3所示, $A\{R_A, R_2, R_3, R_5\}$ 中 R_A 为 α 状态, R_2, R_3, R_5 为 β 状态, R_A 到 R_2, R_3, R_5 之间均为 $\bar{\omega}$ 链路。

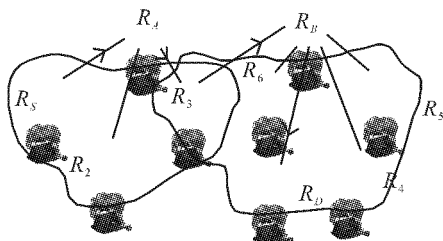


图3 多机器人通信网络

Fig.3 Multi-robots communication network

定义4 网关. 如果 $R_i \in A \cap B$, 则 R_i 为网关. 如图3所示, $R_3 \in \{R_A, R_2, R_3, R_5\}$ 且 $R_3 \in \{R_B, R_3, R_4, R_5, R_6, R_9\}$, 则 R_3 为网关. 网关可以用于在2个组之间转发消息。

定义5 Ack消息. R_i 每隔时间 t 发送一次 Ack 消息, 通知周围 R_j 发送者 R_i 的存在。

1.3.2 建立多机器人通信网络

在1.3.1定义的基础上, 建立多机器人通信网络的规则如下:

1) R_i 初始化的时候均为 γ 状态, 周期性发送 Ack 消息。

2) γ 状态 R_i 从 α 状态 R_j 收到 Ack 消息, 且 R_i 与 R_j 之间有 $\bar{\omega}$ 链路, 则 R_i 加入 R_j 所在的组结构, 同时变为 β 状态。

3) β 状态 R_i 在时间 τ 后, 仍没有收到 α 状态 R_j 的 Ack 消息, 变为 γ 状态。

4) γ 状态 R_i 在时间 τ 后, 仍没有收到 α 状态 R_j 的 Ack 消息, 变为 α 状态。

5) α 状态 R_i 与 α 状态 R_j 之间有 $\bar{\omega}$ 链路, 一定时间后, 则 R_i 或 R_j 按一定的策略放弃 α 状态, 加入

对方的组结构。

6) 由于某种原因 A 中无 α 状态 R_i , A 中其他 R_j 进行新的组长选举, 选出新的组长管理本组。

大规模移动机器人组建的通信网络中, 分级管理机器人的策略可以显著提高通信的效率. 每个机器人周期性地广播 Ack 消息, 其他机器人收到非自身发送的 Ack 消息后记录在本机. 通过这些邻居机器人的信息, 构造组结构. 组长管理组员, 从而形成2级通信结构. 上述规则5)描述的是组结构重构的过程. 当2个组移动到能互相收到对方的 Ack 消息时, 进行组长的选举, 2个组融合成一个组. 通过这种机制, 可以自适应地调整机器人团队中的组结构的规模. 其余更多的细节参见文献[11].

在通信网络建立起来之后, 由组长机器人控制成员机器人, 成员机器人根据组长发送的指令执行相应的运动策略。

1.4 基于虚拟力的多机器人覆盖策略

区域覆盖是指对一个指定区域用一系列称为一跳覆盖区的小区域(圆)将其有重叠地完全覆盖^[12]. 覆盖问题是传感器网络和移动自组网中的一个重要议题, 已有的研究多数集中在如何保证工作的节点能够完全覆盖一个指定的区域上, 在覆盖的同时保持网络的连通性, 可以保证网络在具有一定的有效覆盖度的同时能够连通工作。

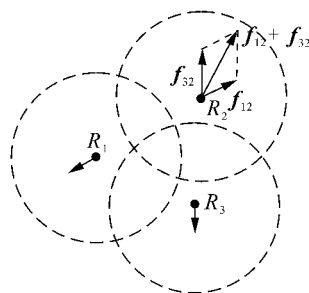


图4 初始机器人受力分析

Fig.4 Forces analysis of initial robots

如图4所示, 假设有3个机器人 R_1, R_2, R_3 , f_{12} 是 R_1 对 R_2 的斥力, f_{32} 是 R_3 对 R_2 的斥力. 力的大小 f_{ij} 可由式(1)确定^[13]:

$$|f_{ij}| = \begin{cases} f(d_{ij}), & \text{if } d_{ij} < 2r_c; \\ 0, & \text{if } d_{ij} \geq 2r_c. \end{cases} \quad (1)$$

方向 $\theta_{ij} = \arctan(k_{ij})$, 其中 k_{ij} 是机器人 R_i 到 R_j 连线的斜率, r_c 为机器人的通信半径. 不妨令机器人 $R_1, R_{2(\text{old})}, R_{2(\text{new})}, R_3$ 的坐标分别为 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x'_2, y'_2)$ 和 (x_3, y_3) , 则 k_{12} 和 k_{32} 如下:

$$\begin{cases} k_{12} = \tan\theta_{12} = (y_2 - y_1)/(x_2 - x_1), \\ k_{32} = \tan\theta_{32} = (y_3 - y_2)/(x_3 - x_2). \end{cases} \quad (2)$$

f_{12} 和 f_{32} 作用在 R_2 的合力 $F_2 = f_{12} + f_{32}$ 大小为

$$|F_2| = \sqrt{f_{12}^2 + f_{32}^2 + 2f_{12}f_{32}(\sin\theta_{12}\sin\theta_{32} + \cos\theta_{12}\cos\theta_{32})}. \quad (3)$$

合力 F_2 的方向为

$$k_2 = \frac{\sqrt{1+k_{32}^2}f(d_{12}) + \sqrt{1+k_{12}^2}f(d_{32})}{k_{12}\sqrt{1+k_{32}^2}f(d_{12}) + k_{32}\sqrt{1+k_{12}^2}f(d_{32})}. \quad (4)$$

合力 F_2 促使机器人 $R_{2(\text{old})}$ 移动到一个新的位置 $R_{2(\text{new})}$ 移动轨迹方程如式(5)所示:

$$y'_2 = k_2 x'_2 + y_2 - k_2 x_2. \quad (5)$$

当机器人受某种约束的时候,则停止运动.在该系统中,为了保证使覆盖的区域达到最大,机器人移动的距离应满足达到六边形覆盖的要求^[13],即

$$|R_1 R_{2(\text{new})}| = (\sqrt{3}r_c)^2 \text{ 且 } |R_3 R_{2(\text{new})}| = (\sqrt{3}r_c)^2.$$

由于在通信网络中存在组长和成员2种节点,形成一种层次网络结构,因此这种基于虚拟力的覆盖策略只在组长机器人之间执行,这样能有效地节省机器人之间的通信量和运动距离,能有效地节省机器人的能量.

2 仿真系统的实现

在第1部分仿真系统结构的设计基础上,对该系统用VC++6.0和Matlab进行了相应的实现.系统仿真界面如图5所示.

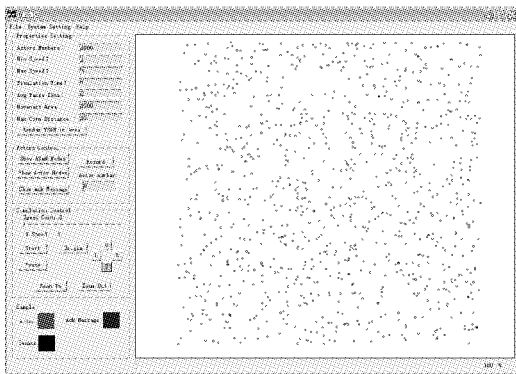


图5 通信仿真系统界面

Fig. 5 Interface of communication system

用户可以自定义仿真机器人数量、最小速度、最大速度、仿真时间等数据.由于机器人能量和信号发射功率的限制,每个机器人都有最大通信距离.本系统仿真采用同构机器人,机器人参数均相同.定义好这些参数之后,产生随机运动场景文件,机器人初始位

置分布如图6所示.启动通信网络之后,即开始进行组结构的构建.选择开始仿真,机器人节点开始做随机运动,由于有排斥力的约束,运动过程中机器人的位置是按照最大覆盖的要求运动的,组长受力运动过程如图7所示.机器人最终覆盖结果如图8所示.

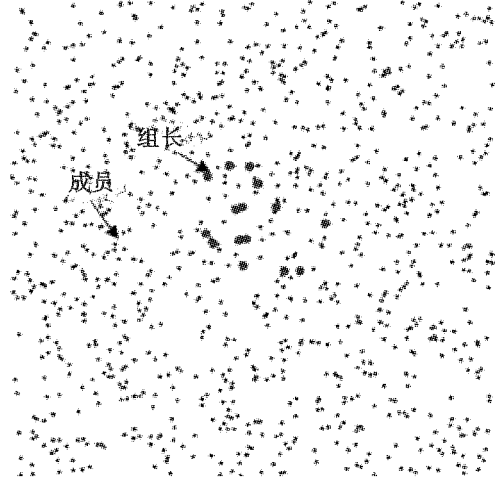


图6 机器人的初始位置

Fig. 6 Initial deployment of robots

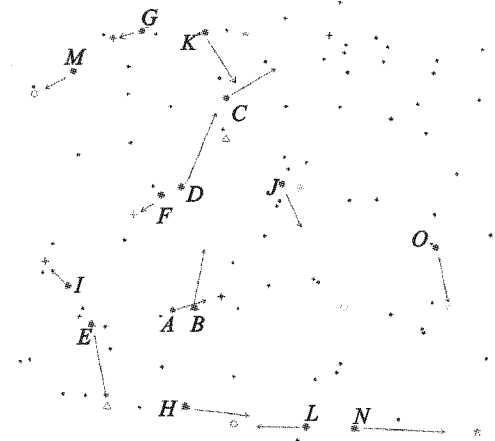


图7 组长机器人受力运动过程

Fig. 7 Movement procedure of robots by forces

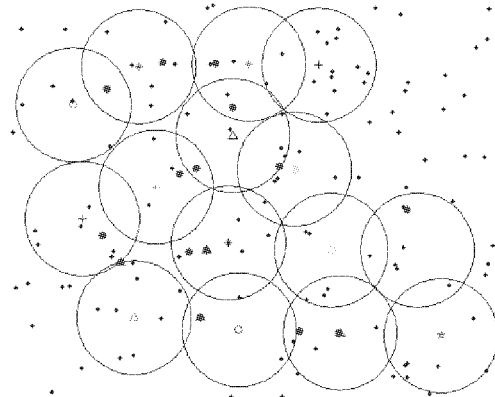


图8 机器人最终覆盖结果

Fig. 8 Final deployment of robots

3 结束语

在多移动机器人相互协作完成任务的过程中,机器人所采用的通信方式的优劣是任务完成的保障之一.本文分析了现有多机器人仿真平台通信网络的仿真方面的一些不足,提出了一种通信网络仿真平台的系统设计方案.可自定义仿真参数和为其他控制算法预留了接口,使该系统具有良好的人机交互功能.文中以多机器人系统中的连通覆盖问题为例,对该仿真系统进行了实现.

通过进一步编程,用户可以在仿真系统中嵌入自己的控制算法和分析日志函数,使该仿真平台可以方便地对通信网络进行仿真和性能分析.

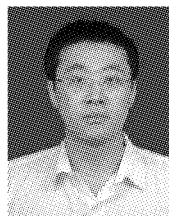
参考文献:

- [1] 谭民,王硕,曹志强.多机器人系统[M].北京:清华大学出版社,2005:10-11.
- [2] 黎萍,杨宜民.多机器人系统任务分配的研究进展[J].计算机工程与应用,2008,44(17):201-205.
LI Ping, YANG Yimin. Progress of task allocation in multi-robot systems[J]. Computer Engineering and Application, 2008,44(17):201-205.
- [3] HELSINGER, THOME A, WRIGHT M T. Cougaar: a scalable, distributed multi-Agent architecture[J]. IEEE Int Con on Systems, Man and Cybernetics, 2004, 2(10/13): 1910-1917.
- [4] PAUL E R, AMY L, HARINI V, MONICA L, MARIA G. Performance evaluation of a multi-robot search & retrieval system: experiences with MinDART[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2008, 52(3/4): 363-387.
- [5] KOUTSONIKOLAS D, DAS S M, HU Y C. CoCoA: coordinated cooperative localization for mobile multi-robot ad hoc networks[C]//26th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems. Lisboa, Portugal, 2006(4/7):9.
- [6] TUCKER B. Behavioral diversity in learning robot teams [D]. Atlanta, USA: College of Computing, Georgia, 1998.
- [7] ITSUKI N, HITOSHI M. Soccer server and researches on multiagent systems[C]//Pro of the IROS96 Workshop on RoboCup. Osaka, 1996:1323-1327.
- [8] 王佳,吴晓蓓,徐志良.多机器人系统的互联控制问题讨论[J].控制工程,2007,14(5):527-531.
WANG Jia, WU Xiaobei, XU Zhiliang. Discussion on in interconnection control problems of multi-robot systems[J]. Control Engineering, 2007, 14(5):527-531.
- [9] 原魁,李园,房立新.多移动机器人系统研究发展近况[J].自动化学报,2007,33(8):785-794.
YUAN Kui, LI Yuan, FANG Lixin. Multiple mobile robot systems: a survey of recent work[J]. Acta Automatica Sinica, 2007,33(8):785-794.
- [10] 王建新,李健,朱贤曼. MANET 中节点的运动模型和性能分析[J].计算机工程,2006,32(19):125-130.
WANG Jianxin, LI Jian, ZHU Xianman. Performance analysis of mobility models in MANET[J]. Computer Engineering, 2006,32(19):125-130.
- [11] 任孝平,蔡自兴.基于移动自组网的多机器人远程监控[J].华中科技大学学报:自然科学版,2008,36(Sup. I):239-242.
REN Xiaoping, CAI Zixing. Remote monitoring of multi-mobile robots based on ad hoc network[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition, 2008,36(Sup I):239-242.
- [12] 任孝平,蔡自兴,陈爱斌.一种移动自组网的区域覆盖策略[J].计算机工程,2008,34(2):159-162.
REN Xiaoping, CAI Zixing, CHEN Aibin. Area-covering tactics for ad Hoc network[J]. Computer Engineering, 2008,34(2):159-162.
- [13] AKKAYA K, JANAPALA S. Maximizing connected coverage via controlled actor relocation in wireless sensor and actor networks[J]. Computer Networks, 2008, 52(14): 2779-2796.

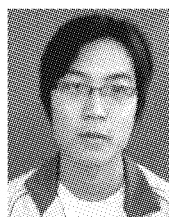
作者简介:



蔡自兴,男,1938年生,教授、博士生导师,主要研究方向为人工智能、机器人、智能控制等.获科教奖励30多项,其中国家级奖励2项,省部级奖励20多项.发表学术论文550余篇,出版专著和教材26部.



任孝平,男,1984年生,博士研究生,主要研究方向为多机器人系统、通信网络等.



邹磊,男,1985年生,硕士研究生,主要研究方向为多机器人系统、无线传感器网络等.