

基于机器人群的主动传感器网络自组织的运动规划

樊玮虹¹ 刘云辉^{1,2} 周东翔¹ 蔡宣平¹

摘要 主动传感器网络的自组织通常要求移动节点群(机器人)通过障碍物环境移动到指定地点后,重新调整并按预定布局组网.在网络的自组织过程中要保证每个移动节点(机器人)与整个网络之间的连通性.在对移动机器人的保持连通性进行优化的基础上,提出了单步位置预测与群体势场相结合的分步运动规划方法进行主动传感器网络的部署和重置,证明了机器人运动控制的稳定性和网络的连通性保持,进行了有和无障碍物环境下超过 40 个机器人的仿真,结果表明该方法适用于大规模的主动传感器网络重置,并对不同规模的网络具有可扩展性.

关键词 主动传感器网络, 自组织, 保持连通性, 单步位置预测, 群体势场, 稳定性分析

DOI 10.3724/SP.J.1004.2010.01409

Motion Planning for Self-organization of Active Sensor Networks Based on Multi-robots

FAN Wei-Hong¹ LIU Yun-Hui^{1,2} ZHOU Dong-Xiang¹ CAI Xuan-Ping¹

Abstract Self-organization of an active sensor network always requires a group of mobile nodes (robots) to move from an area to a desired area in the environment with obstacles to reconfigure the network topology according to the scheduled layout. During the self-organization, it needs to be ensured that each mobile node (robot) maintains the wireless link to the network. By optimizing the preserved connectivity of the mobile robots, a distributed motion planning algorithm based on a single-step location prediction and collective potential field is presented to deploy and reconfigure the active sensor network. The stability of controlling the mobile nodes and the preserved connectivity of the network are analyzed. Simulations are conducted for a group of more than 40 robots with and without obstacles in the environment. The results show that the proposed algorithm is effective for reconfiguration of a large scale active sensor network, as well as the networks with different sizes.

Key words Active sensor network, self-organization, preserved connectivity, single-step location prediction (SSLP), collective potential field (CPF), stability analysis

基于机器人群的主动传感器网络是指搭载在空间分布的移动机器人上的传感器群组成的网络.网络中的每个机器人都具有局部检测和运动能力,相互间通过无线通信进行信息交换,从而实现大面积、实时、主动式和交互式信息获取、信息处理和融合.这种通过自组织和重置主动收集信息的能力使得主动传感器网络具有比被动传感器网络更优的环境覆盖和更快速的动态变化环境响应.

由于每个移动机器人携带传感器的数目和种类有限,根据任务和需求的差异,要求功能各异的传感器能够互相配合,协作完成指定任务.然而传感器的协作过程必须通过可移动机器人群的自组织来完成.

基于机器人群的主动传感器网络的自组织通常要求机器人移动到某一指定位置并按预定布局组网.自组织过程中需要满足的条件分为两类:1)保持网络布局;2)保证网络节点之间的无线通信.由于实际野外环境和军事应用的动态性和不确定性,机器人在移动过程中一直保持预置网络布局的可能性非常小,因此通过条件 2)来完成指定任务是非常有效的方法.如何让每个节点与网络时刻保持连通性是本文研究的重点.

Flocchini 等^[1]提出了一种协议,使得有限视觉感知、无记忆的匿名机器人在有限的时间内群集在同一个地点.这种方法的鲁棒性和容错性有待于验证,且没有考虑如何避障.Olfati-Saber^[2]设计了一个基于多智能体网络系统的分布式群集算法的理论框架,通过定义群的几何模型 α 格构造群体势场函数,将随机分布的智能体群集起来.仿真结果表明并没有完全实现全网连通.

我们需要寻求一种具有可扩展性和灵活性的分布式策略实现网络的自组织运动.人工势场法是一种分布式控制方法,容错性强,适用于对队形的几何

收稿日期 2009-09-25 录用日期 2010-04-19
Manuscript received September 25, 2009; accepted April 19, 2010

国家自然科学基金(60675056)资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (60675056)

1. 国防科学技术大学电子科学与工程学院 长沙 410073 2. 香港中文大学机械自动化工程学系 香港

1. College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073 2. Department of Mechanical and Automation Engineering, Chinese University of Hong Kong, Hong Kong

形状要求不是很严格、机器人数目较多的情况. Balch 和 Hybinette^[3] 首次提出了群体势场法, 为大规模的同类机器人以某种几何队形在障碍物环境中进行导航. Yuan 等^[4] 运用群体势场法描述了一个分层组织的关系. Schneider 等^[5] 和 Fan 等^[6] 分别将三种势场力的合成运用于多机器人编队.

本文首先建立主动传感器网络模型, 进行连通性保持的优化处理, 提出单步位置预测与群体势场相结合的分布式运动规划方法实现网络的自组织, 理论证明机器人运动控制的稳定性和网络的连通性保持, 超过 40 个机器人的自组织仿真实验表明, 该方法适用于大规模的主动传感器网络并具有可扩展性.

1 主动传感器网络模型

考虑二维空间 \mathbf{R}^2 中由 M 个机器人组成的主动传感器网络, 网络中的每个机器人视为平面上自由运动的一个质点^[1, 7]. 令 $\mathbf{x}^i, \mathbf{x}^j \in \mathbf{R}^2$ 分别表示机器人 R_i 和 R_j 的位置, 通信半径为 r_c . 首先定义机器人 R_i 的邻居集如下:

定义 1. 以机器人 R_i 的位置 \mathbf{x}^i 为中心, 通信半径 r_c 的圆形邻接区域定义为

$$B(\mathbf{x}^i, r_c) = \{\mathbf{x} \in \mathbf{R}^2 : \|\mathbf{x} - \mathbf{x}^i\| \leq r_c\} \quad (1)$$

机器人 R_j 与机器人 R_i 的通信关系可表示为

$$a_{ij}(\mathbf{x}^i) = \begin{cases} 1, & \mathbf{x}^j \in B(\mathbf{x}^i, r_c), \quad j \neq i \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (2)$$

则机器人 R_i 的邻居集定义为

$$N_i = N(\mathbf{x}^i) = \{j : a_{ij}(\mathbf{x}^i) > 0\} \quad (3)$$

其次, 机器人 R_j 与机器人 R_i 之间的距离表示为

$$d_{ij} = d(\mathbf{x}^i, \mathbf{x}^j) = \|\mathbf{x}^j - \mathbf{x}^i\|$$

再者, 机器人 R_i 的运动方程由下式给出^[8-9]:

$$\dot{\mathbf{x}}^i = -\nabla_{\mathbf{x}^i} \sigma(\mathbf{x}^i) + \sum_{j \in N_i} g(\mathbf{x}^i - \mathbf{x}^j), \quad i = 1, \dots, M \quad (4)$$

其中, $\sigma : \mathbf{R}^2 \rightarrow \mathbf{R}$ 表示机器人 R_i 所受到的外界环境的吸引力和/或斥力势函数, $g(\cdot)$ 则表示机器人相互间产生的引力或斥力函数.

2 保持连通性的优化处理

2.1 网络连通, 关联集和圈

将传感器网络抽象为无向图 $G = (V, E)$ ^[10], 集合 V 和 E 分别是节点集和边集, 边 $(u, v) \in E$ 当且

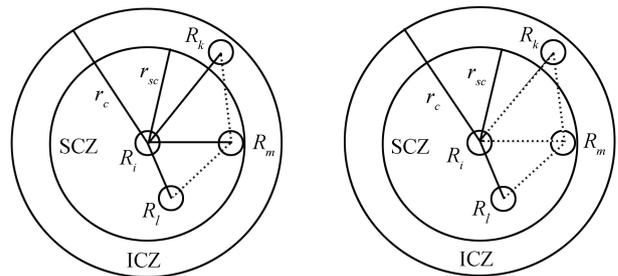
仅当节点 u 和 v 位于相互的通信范围内. 如果 G 中任意两个节点之间存在由 G 中若干边组成的通路, 则图 G 是连通的.

节点 v 是图 G 的一个顶点, 与 v 关联的所有边的集合, 称为顶点 v 的关联集, 记作 $S(v)$ ^[11].

除了第一个和最后一个顶点外, 没有顶点重复的回路称为圈, 用 C_n 记由 n 个顶点构成的圈^[11].

2.2 节点的通信区域划分

将节点 R_i 的有效通信范围划分为安全通信区域 (Safety communication zone, SCZ) 和产生通信引力区域 (Influencing communication zone, ICZ) (图 1(a)), 分别表示为 $B(\mathbf{x}^i, r_{sc})$ 和 $B(\mathbf{x}^i, r_c) - B(\mathbf{x}^i, r_{sc})$, 其中 r_{sc} 表示 SCZ 半径. 节点 R_i 只受到来自 ICZ 内的邻居节点的通信引力, 且随着相互间距离的增加而增大.



(a) 节点的通信区域划分 (b) 优化处理后的网络连通子图
(a) Node communication zone division (b) Network connected subgraph after optimization

图 1 从初始位置到指定区域边界过程中连通性的优化处理
Fig.1 Optimization of connectivity while moving to the desired area boundary from the initial position

对网络的连通性进行优化处理分两个阶段: 1) 从初始位置通过障碍物环境运动到指定区域边界; 2) 从指定区域边界按预定布局进入目标位置.

2.3 从初始位置移动到指定区域边界

若以 G 为基本图, 则任一节点运动都会带动其 ICZ 内的所有节点跟随其运动以保持各邻边连接, 这会消耗大量能量. 考虑节点 v 的关联集 $S(v)$, 指定 v 为树的根, 采用图论中的破圈法^[11], 剪除 $S(v)$ 中的某些长边后生成的星形子图 $T1$ 仍然保持连通. 利用 $T1$ 作为网络基本图, 既不影响网络连通性, 又可以大大减少某一节点运动涉及到的节点数.

例如以图 1(a) 为基本图, 由于邻居节点 R_k 在 R_i 的 ICZ 内, R_i 受到的通信引力为 $\mathbf{F}_{com}^i = \mathbf{F}_{com}^{ik} \neq \mathbf{0}$. 由图 1(a) 知机器人 R_i 的关联集 $S(R_i) = \{(R_i, R_k), (R_i, R_l), (R_i, R_m)\}$, 图中含有两个 C_3 , 分别是 $R_i R_k R_m R_i$ 和 $R_i R_m R_l R_i$. 令 R_i 为树的根, 采用破圈法剪除 $S(R_i)$ 中较长边 (R_i, R_k) 和

(R_i, R_m) , 得到的子图 (图 1 (b)) 仍然保持网络连通. 又机器人 R_i 在 R_i 的 SCZ 内, 因而有 $F_{com}^i = 0$.

2.4 从指定区域边界到达目标位置

通常认为目标位置区域内没有环境障碍物. 任一节点进入指定区域边界后, 首先在邻居集内找到距离其目标位置最近的邻居节点, 然后判断该邻居节点是否会对节点产生通信引力. 图 2 中右上角的三角形表示节点 R_i 的目标位置 x^g , 邻居节点 R_k 距离 x^g 最近, 并且在 R_i 的 ICZ 内, 因而产生通信引力 F_{com}^{ik} . 在目标引力的共同作用下, R_i 不断地向目标位置靠拢.

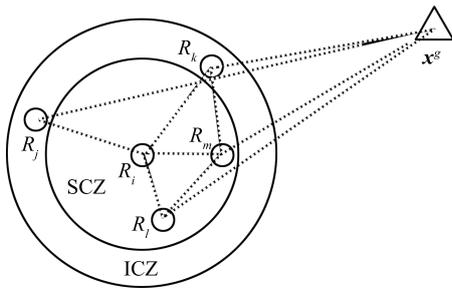


图 2 从指定区域边界到目标位置过程中连通性的优化处理
Fig. 2 Optimization of connectivity while reaching the target position from the desired area boundary

3 自组织运动规划策略

3.1 运动策略

以往的群体势场法中, 机器人只要在其感知区域内检测到环境障碍物或其他机器人时就会产生斥力. 在障碍物较多或机器人之间距离较近的情况下容易产生振荡, 甚至与障碍物或邻居节点发生碰撞. 下面将通过分析机器人的运动过程, 提出单步位置预测与群体势场相结合的方法来规划机器人的运动. 以机器人 R_i 为例, 详细步骤如下:

步骤 1. 预测下一步的期望位置. 机器人必须在保持与网络连通的条件下向着目标位置前进, 因此首先根据机器人 R_i 的当前位置及与邻居节点的连通性, 分别计算其目标引力 F_{goal}^i 和经过连通性保持优化处理后的通信引力 F_{com}^i , 得到合力 $F_{att}^i = F_{goal}^i + F_{com}^i$, 再根据 R_i 的当前状态和合力得到下一个期望位置.

步骤 2. 判断机器人的旋转运动是否独立于它的平移运动. 如果旋转与平移同时进行, 转步骤 4; 否则可以先原地旋转至合力方向, 再朝着合力方向产生平移. 这种情况下首先要判断合力方向上是否有障碍物或其他机器人. 如果没有, 总合力 $F_{total}^i = F_{att}^i$, 转步骤 6; 如果有, 由该方向上距离 R_i 最近的障碍物或其他机器人产生一个斥力 F_{rep}^i , 得到合力

$F_{att}^i + F_{rep}^i$, 转步骤 3.

步骤 3. 判断合力 $F_{att}^i + F_{rep}^i$ 的方向性. 如果与 F_{att}^i 同向, $F_{total}^i = F_{att}^i + F_{rep}^i$, 转步骤 6; 否则还要判断其合力方向上是否有障碍物或其他机器人. 若没有, $F_{total}^i = F_{att}^i + F_{rep}^i$, 转步骤 6; 否则, 由该方向上距离 R_i 最近的障碍物或其他机器人产生一个斥力 F_{rep}^{io} , 总合力 $F_{total}^i = F_{att}^i + F_{rep}^i + F_{rep}^{io}$, 再转步骤 6.

步骤 4. 令 $0 \leq \theta \leq \pi$ 为当前运动方向与合力 F_{att}^i 方向之间的夹角, 判断夹角所包含的检测区域内是否有障碍物或其他机器人. 如果没有, 总合力 $F_{total}^i = F_{att}^i$, 转步骤 6; 否则转步骤 5.

步骤 5. 按照传统的人工势场法进行计算, 得到总合力 F_{total}^i , 转步骤 6.

步骤 6. 机器人 R_i 向着总合力 F_{total}^i 的方向运动.

如图 3 所示, 运用传统群体势场法求出的机器人 R_i 的总合力 $F_{total}^i = F_{att}^i + F_{rep}^i$. 根据上述运动规划策略得到的总合力 $F_{total}^i = F_{att}^i$, 尽管机器人 R_i 检测到障碍物, 但是由于该障碍物并不在 R_i 的当前运动方向与合力 F_{att}^i 的夹角 θ 之间, 因此不需要考虑该障碍物产生的斥力, 机器人 R_i 最终向着 F_{att}^i 的方向前进.

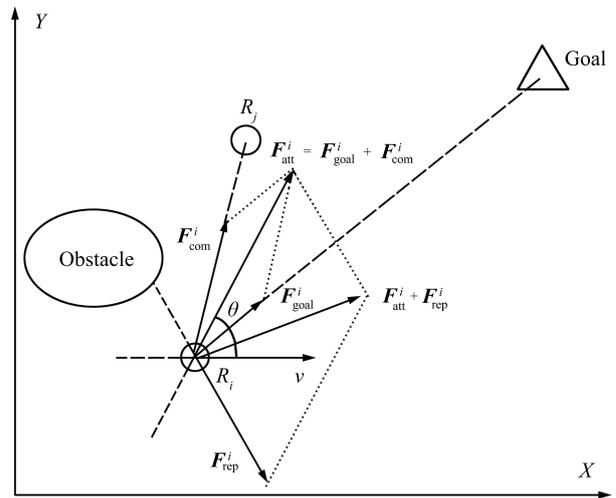


图 3 机器人 R_i 的受力示意图
Fig. 3 Resultant force scheme of robot R_i

3.2 具体实现

令机器人的平移速度为 $v_i \leq v_{max}$ ($i = 1, \dots, M$), x^i ($i = 1, \dots, M$) 为当前时刻机器人的位置, 运动时间周期为 T . 假设未知环境中的障碍物为静态障碍物, 下面分析机器人 R_i 的受力情况.

1) 避碰产生的斥力

设 x^o 是障碍物 R_o 上距离机器人 R_i 最近的点

的位置, 则二者之间的最短距离为 $d_{io} = \|\mathbf{x}^o - \mathbf{x}^i\|$. 如果机器人 R_i 要在运动周期 T 内避开障碍物 R_o 必须满足: $d_{io} > v_i \cdot T$; 要避开机器人 R_j 则必须满足: $d_{ij} > (v_i + v_j) \cdot T$.

由于 $v_i \leq v_{\max}$ ($i = 1, \dots, M$), 运动周期 T 内的避碰距离 d_a 可表示为下式, 其中 $\varepsilon > 0$ 且比较小.

$$d_a = 2v_{\max} \cdot T + \varepsilon > d_{ij} \geq d_{io} \quad (5)$$

为确保不发生碰撞, 令最小避碰距离 $d_a^{\min} \ll d_a$, 则斥力势函数及其相应的斥力分别表示为式 (6) 和式 (7), 其中 k_{rep} 为常数比例因子, $d_{ir} = d_{io}$ 或 d_{ij} .

$$U_{\text{rep}}^{ir}(\mathbf{x}^i) = \begin{cases} 0, & d_{ir} \geq d_a \\ \frac{1}{2}k_{\text{rep}}\left(\frac{1}{d_{ir}} - \frac{1}{d_a}\right)^2, & d_a^{\min} \leq d_{ir} < d_a \\ \infty, & d_{ir} < d_a^{\min} \end{cases} \quad (6)$$

$$\mathbf{F}_{\text{rep}}^{ir}(\mathbf{x}^i) = -\nabla_{\mathbf{x}^i} U_{\text{rep}}^{ir}(\mathbf{x}^i) = \begin{cases} \mathbf{0}, & d_{ir} \geq d_a \\ k_{\text{rep}}\left(\frac{1}{d_{ir}} - \frac{1}{d_a}\right)\frac{1}{d_{ir}^2} \cdot \nabla_{\mathbf{x}^i} d_{ir}, & d_a^{\min} \leq d_{ir} < d_a \\ \infty, & d_{ir} < d_a^{\min} \end{cases} \quad (7)$$

2) 通信引力

假设进行保持连通性的优化处理后, 仍需考虑机器人 R_j 与 R_i 之间的连接关系. 当 $r_{sc} < d_{ij} \leq r_c$ 时, 通信引力不为零. 为确保运动周期 T 后通信连接仍然保持, r_{sc} 定义如下:

$$r_{sc} = r_c^{\max} - 2v_{\max} \cdot T \quad (8)$$

并令最大通信距离 r_c^{\max} 为

$$r_c^{\max} = r_c - \xi, \quad \xi > 0 \quad (9)$$

由机器人 R_j 产生的通信引力场和通信引力分别为

$$U_{\text{com}}^{ij}(\mathbf{x}^i) = \begin{cases} 0, & d_{ij} \leq r_{sc} \\ \frac{1}{2}k_{\text{com}}d_{ij}^2, & r_{sc} < d_{ij} \leq r_c^{\max} \\ \infty, & r_c^{\max} < d_{ij} \leq r_c \end{cases} \quad (10)$$

$$\mathbf{F}_{\text{com}}^{ij}(\mathbf{x}^i) = -\nabla_{\mathbf{x}^i} U_{\text{com}}^{ij}(\mathbf{x}^i) = \begin{cases} \mathbf{0}, & d_{ij} \leq r_{sc} \\ k_{\text{com}}(\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i), & r_{sc} < d_{ij} \leq r_c^{\max} \\ \infty, & r_c^{\max} < d_{ij} \leq r_c \end{cases} \quad (11)$$

其中, k_{com} 为常数正比例因子.

3) 目标引力

设 \mathbf{x}^g 为机器人 R_i 的目标位置, 则 R_i 的当前位置 \mathbf{x}^i 到目标位置 \mathbf{x}^g 的距离为 $d_{ig} = \|\mathbf{x}^g - \mathbf{x}^i\|$, 目标引力势场和相应的目标引力分别为

$$U_{\text{goal}}^i(\mathbf{x}^i) = \frac{1}{2}k_{\text{goal}}d_{ig}^2 \quad (12)$$

$$\mathbf{F}_{\text{goal}}^i(\mathbf{x}^i) = -\nabla_{\mathbf{x}^i} U_{\text{goal}}^i(\mathbf{x}^i) = k_{\text{goal}}(\mathbf{x}^g - \mathbf{x}^i) \quad (13)$$

其中, k_{goal} 为常数正比例因子.

需要特别注意的是机器人目标位置的选取问题. 在机器人从初始位置移动到指定区域边界的过程中, 为避免机器人因各自的目标位置太过分散导致行进过程中遇到障碍物后容易陷入局部最小, 我们选取指定目标区域的某个位置作为机器人群的共同目标点. 机器人到达目标区域边界后, 再各自向自己的目标位置前进.

4) 合力

机器人 R_i 在运动过程中受到的总合力 $\mathbf{F}_{\text{total}}^i$ 由斥力 $\mathbf{F}_{\text{rep}}^i = \sum_{k \in A_i} \mathbf{F}_{\text{rep}}^{ik}$, 通信引力 $\mathbf{F}_{\text{com}}^i = \sum_{j \in N_i} \mathbf{F}_{\text{com}}^{ij}$ 和目标引力 $\mathbf{F}_{\text{goal}}^i$ 三部分组成:

$$\mathbf{F}_{\text{total}}^i = \mathbf{F}_{\text{goal}}^i + \mathbf{F}_{\text{com}}^i + \mathbf{F}_{\text{rep}}^i \quad (14)$$

其中, $A_i \subseteq (N_i \cup O_i)$ 表示对机器人 R_i 产生斥力的环境障碍物集 O_i 与邻居集 N_i 的并集.

4 稳定性分析

4.1 机器人运动控制的稳定性分析

第 1 节的式 (4) 给出了机器人 R_i 的运动方程. 其中, $\sigma(\mathbf{x}^i)$ 由目标引力势函数和环境障碍物产生的斥力势函数组成

$$\sigma(\mathbf{x}^i) = \frac{1}{2}k_{\text{goal}}d_{ig}^2 + \frac{1}{2}k_{\text{rep}} \sum_{k \in O_i} \left(\frac{1}{d_{ik}} - \frac{1}{d_a} \right)^2, \quad d_{ik} < d_a \quad (15)$$

则有

$$-\nabla_{\mathbf{x}^i} \sigma(\mathbf{x}^i) = k_{\text{goal}}(\mathbf{x}^g - \mathbf{x}^i) + k_{\text{rep}} \sum_{k \in O_i} \left[\left(\frac{1}{d_{ik}} - \frac{1}{d_a} \right) \cdot \frac{1}{d_{ik}^2} \cdot \nabla_{\mathbf{x}^i} d_{ik} \right] \quad (16)$$

式 (4) 中, $g(\cdot)$ 表示机器人 R_i 与其邻居节点之间的相互作用函数, 包括对 R_i 产生的通信引力函数和机器人之间为避碰产生的斥力函数. 表达式如下

$$\sum_{j \in N_i} g(\mathbf{x}^j - \mathbf{x}^i) = \sum_{j \in N_i} \left[k_{\text{com}}(\mathbf{x}^j - \mathbf{x}^i) + \right.$$

$$k_{\text{rep}} \left(\frac{1}{d_{ij}} - \frac{1}{d_a} \right) \cdot \frac{1}{d_{ij}^2} \cdot \nabla_{\mathbf{x}^i} d_{ij}], \quad d_{ij} < d_a \quad (17)$$

将式 (16) 和式 (17) 代入式 (4), 有

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}^i &= k_{\text{goal}}(\mathbf{x}^g - \mathbf{x}^i) + \\ &k_{\text{rep}} \sum_{k \in O_i} \left[\left(\frac{1}{d_{ik}} - \frac{1}{d_a} \right) \cdot \frac{1}{d_{ik}^2} \cdot \nabla_{\mathbf{x}^i} d_{ik} \right] + \\ &\sum_{j \in N_i} \left[k_{\text{com}}(\mathbf{x}^j - \mathbf{x}^i) + k_{\text{rep}} \left(\frac{1}{d_{ij}} - \frac{1}{d_a} \right) \cdot \frac{1}{d_{ij}^2} \cdot \nabla_{\mathbf{x}^i} d_{ij} \right] \end{aligned} \quad (18)$$

定义机器人群的位置矢量为 $\mathbf{x} = [\mathbf{x}^{1T}, \dots, \mathbf{x}^{MT}]^T$, 令平衡点处的不变集为

$$\Omega_e = \{\mathbf{x} : \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{0}\}$$

我们将证明当 $t \rightarrow \infty$ 时, 起始于 Ω_e 内的每一个解 $\mathbf{x}(t)$ 都将趋于 Ω_e , 即网络布局收敛于一个稳定的结构.

定理 1. 考虑式 (18) 形式的机器人群, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, 有 $\mathbf{x}(t) \rightarrow \Omega_e$.

证明. 机器人 R_i 的能量函数 E^i 的表达式如下:

$$\begin{aligned} E^i &= \frac{1}{2} \left[k_{\text{goal}} d_{ig}^2 + k_{\text{rep}} \sum_{k \in O_i} \left(\frac{1}{d_{ik}} - \frac{1}{d_a} \right)^2 \right] + \\ &\frac{1}{2} \sum_{j \in N_i} \left[k_{\text{com}} d_{ij}^2 + k_{\text{rep}} \left(\frac{1}{d_{ij}} - \frac{1}{d_a} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (19)$$

显然 $E^i \geq 0$. 选取机器人的能量函数 E 作为 Lyapunov 函数 $J(\mathbf{x})$, 即

$$J(\mathbf{x}) = E = \sum_{i=1}^M E^i \quad (20)$$

它的一阶导数为

$$\dot{J}(\mathbf{x}) = [\nabla_{\mathbf{x}} J(\mathbf{x})]^T \cdot \dot{\mathbf{x}} = \sum_{i=1}^M [\nabla_{\mathbf{x}^i} J(\mathbf{x})]^T \cdot \dot{\mathbf{x}}^i \quad (21)$$

又 $J(\mathbf{x})$ 在 \mathbf{x}^i 处的梯度为

$$\begin{aligned} -\nabla_{\mathbf{x}^i} J(\mathbf{x}) &= k_{\text{goal}}(\mathbf{x}^g - \mathbf{x}^i) + \\ &k_{\text{rep}} \sum_{k \in O_i} \left[\left(\frac{1}{d_{ik}} - \frac{1}{d_a} \right) \cdot \frac{1}{d_{ik}^2} \cdot \nabla_{\mathbf{x}^i} d_{ik} \right] + \\ &\sum_{j \in N_i} \left[k_{\text{com}}(\mathbf{x}^j - \mathbf{x}^i) + k_{\text{rep}} \left(\frac{1}{d_{ij}} - \frac{1}{d_a} \right) \cdot \frac{1}{d_{ij}^2} \cdot \nabla_{\mathbf{x}^i} d_{ij} \right] \end{aligned} \quad (22)$$

将式 (18) 和式 (22) 相比较, 可得

$$\nabla_{\mathbf{x}^i} J(\mathbf{x}) = -\dot{\mathbf{x}}^i \quad (23)$$

将上式代入式 (21), 对于所有 $t \geq 0$, 有

$$\dot{J}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^M [\nabla_{\mathbf{x}^i} J(\mathbf{x})]^T \cdot \dot{\mathbf{x}}^i = -\sum_{i=1}^M (\|\dot{\mathbf{x}}^i\|)^2 \leq 0 \quad (24)$$

根据拉塞尔 (LaSalle) 不变集定理, 可以得出结论: 令 Ω 为 Ω_e 中的所有 $\dot{J}(\mathbf{x}) = 0$ 的点的集合, 则当 $t \rightarrow \infty$ 时, 位置矢量 \mathbf{x} 收敛于这个最大不变子集, 即

$$\Omega = \{\mathbf{x} : \dot{J}(\mathbf{x}) = 0\} = \{\mathbf{x} : \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{0}\} = \Omega_e \quad (25)$$

由于 Ω_e 中的每个点都是平衡点, 所以 Ω_e 是一个不变集, 从而定理得证. \square

4.2 网络连接的可靠性分析

根据网络连通性优化的两个阶段分别讨论网络连通的可靠性.

定理 2 (第一阶段). 从初始位置向指定区域边界运动过程中, 如果时刻 t 机器人 R_i 和 R_m 之间满足 $d_{im}(t) \leq r_c$, 且有 $r_c^{\max} = r_c - 2v_{\max}T$, 那么经过运动周期 T , 即在时刻 $t+T$ 仍然满足 $d_{im}(t+T) \leq r_c$.

证明. 根据节点通信区域的划分进行讨论.

1) 当 $d_{im}(t) \leq r_{sc}$ 时, 有

$$d_{im}(t+T) \leq d_{im}(t) + 2v_{\max}T < r_c$$

2) 当 $r_{sc} < d_{im}(t) \leq r_c^{\max}$ 时, 令式 (9) 中的 $\xi = 2v_{\max}T$, 则有 $r_c^{\max} = r_c - 2v_{\max}T$.

$$d_{im}(t+T) \leq r_c^{\max} + 2v_{\max}T = r_c$$

3) 当 $r_c^{\max} < d_{im}(t) \leq r_c$ 时, 机器人 R_i 和 R_m 分别受到大小为 ∞ 的通信引力 $\mathbf{F}_{\text{com}}^{im}$ 和 $\mathbf{F}_{\text{com}}^{mi}$ (见图 4). 记 $\mathbf{F}_{\text{other}}^i = \mathbf{F}_{\text{total}}^i - \mathbf{F}_{\text{com}}^{im}$, $\mathbf{F}_{\text{other}}^m = \mathbf{F}_{\text{total}}^m - \mathbf{F}_{\text{com}}^{mi}$.

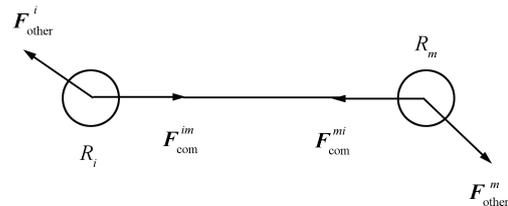


图 4 从初始位置向指定区域边界运动过程中网络连通性分析

Fig. 4 Analysis of the network connectivity while moving to the desired area boundary from the initial position

a) 当 $\|\mathbf{F}_{\text{other}}^i\| < \infty$ 且 $\|\mathbf{F}_{\text{other}}^m\| < \infty$ 时可忽略不计, 因此有

$$d_{im}(t+T) = d_{im}(t) - 2v_{\max}T \leq r_c^{\max}$$

b) 当 $\|\mathbf{F}_{\text{other}}^i\| \rightarrow \infty$ 或 $\|\mathbf{F}_{\text{other}}^m\| \rightarrow \infty$ 时, 有

$$d_{im}(t+T) \leq d_{im}(t) - v_{\max}T < r_c$$

c) 当 $\|\mathbf{F}_{\text{other}}^i\| \rightarrow \infty$ 且 $\|\mathbf{F}_{\text{other}}^m\| \rightarrow \infty$ 时, 有

$$d_{im}(t+T) \leq d_{im}(t) \leq r_c$$

考虑极端情况: $\mathbf{F}_{\text{other}}^i$ 与 $\mathbf{F}_{\text{com}}^{im}$ 方向相反, 同时 $\mathbf{F}_{\text{other}}^m$ 与 $\mathbf{F}_{\text{com}}^{mi}$ 方向相反, 这时 R_i 和 R_m 因为各自的总合力为零而静止不动, 则有

$$d_{im}(t+T) = d_{im}(t) \leq r_c \quad \square$$

定理 3 (第二阶段). 从指定区域边界按预定布局进入目标位置的运动过程中, 假设时刻 t 全网连通, 那么机器人 R_i 在时刻 $t+T$ 仍与网络保持连通.

证明. 首先确定指定目标区域的边界以及目标位置之间的间隔. 为使机器人 R_i 可以在相邻的两个目标位置之间通行而不受到斥力和通信引力的影响, 两个目标位置之间的间隔 d_{interval} 应满足: $2d_a \leq d_{\text{interval}} \leq r_{sc}$. 指定区域的边界设定为边界点位置向外膨胀 d_{interval} .

由于 $d_{\text{interval}} \geq 2d_a$ 以及网络连通性的优化处理, 机器人 R_i 除受到目标引力的作用外, 最多只受到一个通信引力和一个斥力的影响. 即

$$\mathbf{F}_{\text{total}}^i = \mathbf{F}_{\text{goal}}^i + \mathbf{F}_{\text{com}}^{ij} + \mathbf{F}_{\text{rep}}^{ik}$$

式中, 机器人 R_j 应满足 $d_{jg}(t) = \min_{j \in N_i} \|\mathbf{x}^g - \mathbf{x}^j\|$, 其中 \mathbf{x}^g 为 R_i 的目标位置; R_k 满足 $d_{ik}(t) < d_a$.

1) 当 $\mathbf{F}_{\text{rep}}^{ik} \neq \mathbf{0}$ 时, 有 $d_{ik}(t) < d_a$, 又 $d_a = 2v_{\max}T + \xi$, 所以

$$d_{ik}(t+T) \leq d_{ik}(t) + 2v_{\max}T < 2d_a < r_c$$

2) 当 $\mathbf{F}_{\text{rep}}^{ik} = \mathbf{0}$ 时, R_i 受到的合力为 $\mathbf{F}_{\text{total}}^i = \mathbf{F}_{\text{goal}}^i + \mathbf{F}_{\text{com}}^{ij}$.

a) 当 $d_{ij}(t) \leq r_{sc}$ 时, 有

$$d_{ik}(t+T) \leq r_{sc} + 2v_{\max}T = r_c^{\max}$$

b) 当 $r_{sc} < d_{ij}(t) \leq r_c^{\max}$ 时, 有

$$d_{ik}(t+T) \leq r_c^{\max} + 2v_{\max}T = r_c$$

c) 当 $r_c^{\max} < d_{ij}(t) \leq r_c$ 时, $\|\mathbf{F}_{\text{com}}^{ij}\| \rightarrow \infty$, 目标引力忽略不计, 有 $\mathbf{F}_{\text{total}}^i = \mathbf{F}_{\text{com}}^{ij}$, 则

$$d_{ik}(t+T) \leq d_{ik}(t) - v_{\max}T < r_c$$

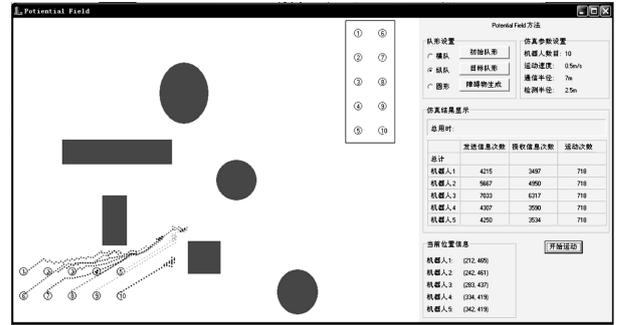
□

5 仿真

假设初始全网连通, 机器人感知半径为 2.5 m, 通信半径为 7 m, 最大运动速度为 0.5 m/s. 机器人的运动周期为 $T = 1$ s, 仿真区域大小为 $80 \text{ m} \times 60 \text{ m}$. 机器人的旋转运动独立于它的平移运动, 运动周期内机器人原地旋转至合力方向后, 再产生平移.

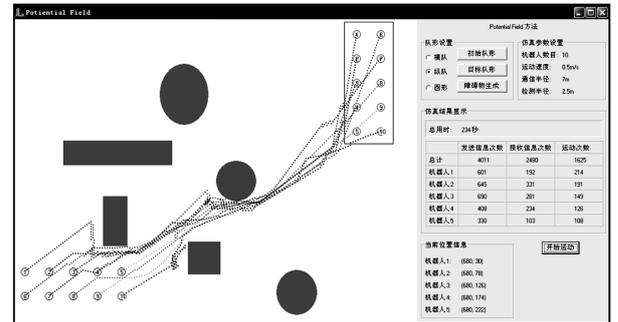
5.1 保持连通性的优化处理

实验 1 由 10 个移动机器人组成主动传感器网络, 假设初始队形为横队, 从左下角开始运动, 穿过环境障碍物到达右上角的目标位置, 预定布局为纵队. 图 5(a) 为没有进行网络连通性优化处理的结果, 可以看到网络节点并没有到达目标位置. 这是因为随着邻居节点的增多, 每个节点需要考虑的相互间通信引力和斥力增多, 最终导致振荡或停止运动. 图 5(b) 中网络节点在运动规划过程中进行了保持连通性的优化处理, 在不影响网络连通性的情况下于有限时间内到达了目标位置.



(a) 没有进行保持连通性的优化处理

(a) No optimization of preserved connectivity



(b) 进行了保持连通性的优化处理

(b) Preserved connectivity being optimized

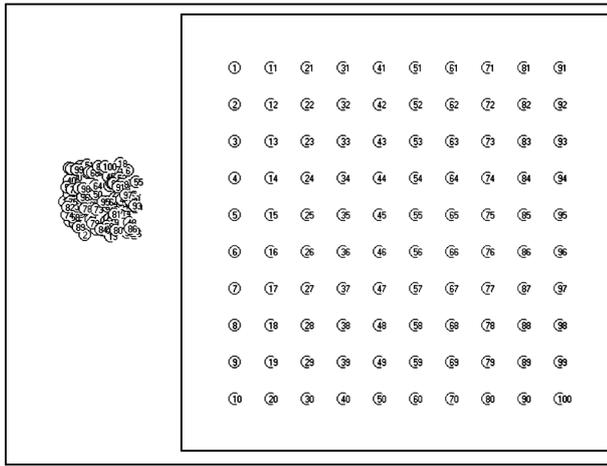
图 5 保持连通性的优化处理

Fig. 5 Optimization of preserved connectivity

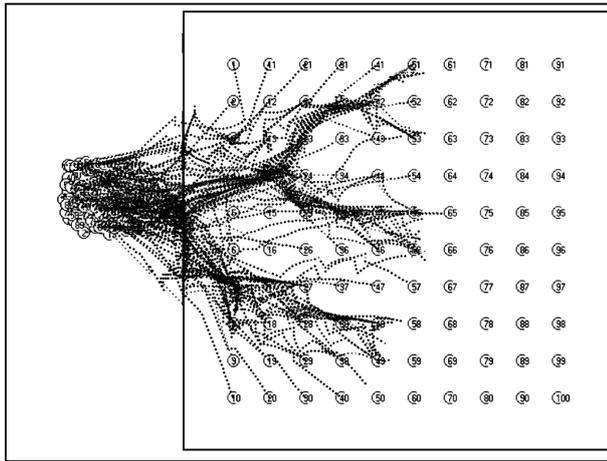
5.2 初始网络重置

实验 2 由 100 个移动机器人组成的主动传感器网络实现初始网络重置. 图 6(a) 中左侧区域内的多

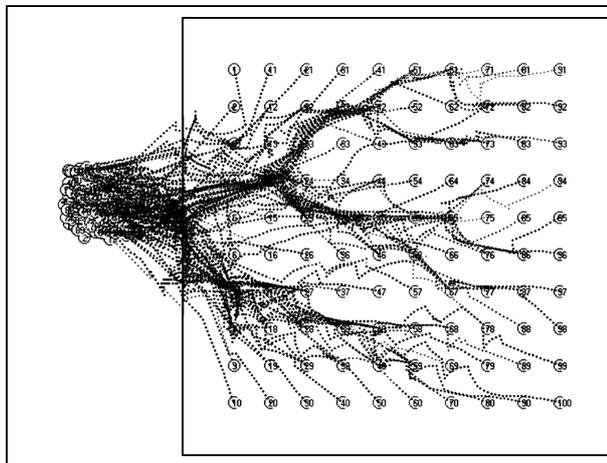
□



(a) 初始位置
(a) Initial location



(b) 中间过程
(b) Interim phase



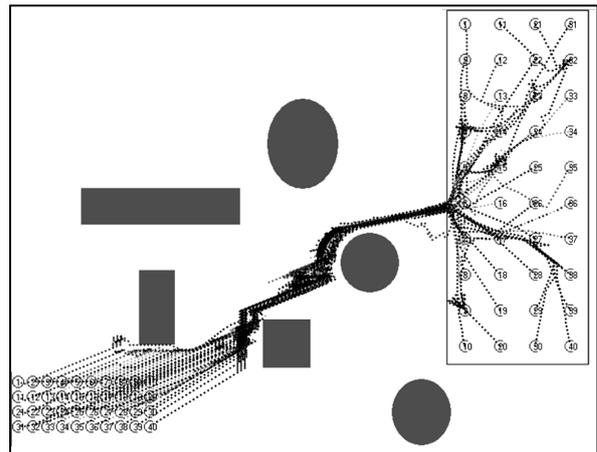
(c) 最终结果
(c) Final result

图6 初始网络重置 ($N = 100$)
Fig.6 Initial deployment of the network ($N = 100$)

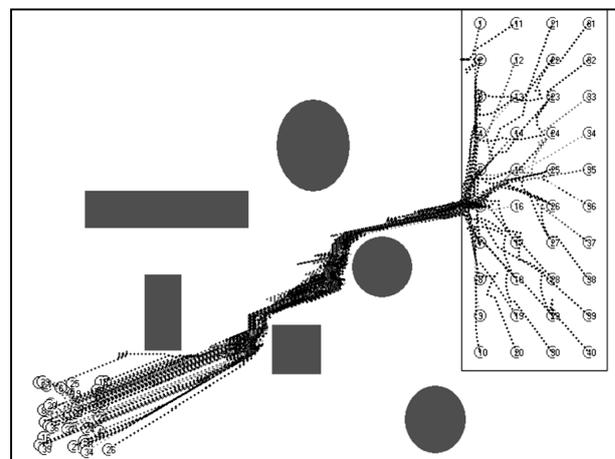
个小圆圈表示机器人群的初始位置, 右侧的方框表示指定布局的目标区域, 方框内的小圆圈表示每个机器人的目标位置. 网络中的机器人在运动的过程中必须保持与网络的通信连接, 同时避免与其他机器人发生碰撞, 最终到达指定位置. 图 6 (b) 和 6 (c) 分别是网络重置的中间过程和最终结果.

5.3 障碍物环境下主动传感器网络的自组织

实验 3 为由 40 个移动机器人组成的主动传感器网络进行障碍物环境下的自组织运动. 图 7 (a) 中左下角的多个小圆圈表示机器人的初始位置, 机器人以横队队形排列, 图 7 (b) 中为初始随机分布、全网连通的机器人, 右上角的方框表示指定布局的目标区域, 目标区域内的小圆圈表示每个机器人的目标位置. 画面中, 6 个形状各异的灰色物体表示



(a) 初始横队队形
(a) Initial line formation



(b) 初始随机分布
(b) Initial random distribution

图7 障碍物环境中的主动传感器网络自组织运动 ($N = 40$)
Fig.7 Reconfiguration of the active sensor network in obstacle environment ($N = 40$)

环境中的障碍物。

运动规划过程中,网络中的机器人各自规划自身的运动。在到达目标区域边界之前,选定目标区域的中心位置为共同目标点,采用第 2.3 节“从初始位置移动到指定区域边界”方法保持网络的连通性。机器人到达目标区域边界后,采用第 2.4 节“从指定区域边界到达目标位置”方法保持与网络的通信连接,各自向其目标位置前进。

6 结束语

本文提出了一种分布式的主动传感器网络自组织运动规划的方法。首先对网络的连通性保持进行了优化处理,详细分析了网络连接的可靠性;提出了基于单步位置预测与群体势场法相结合的分布式运动规划方法,降低了实现的复杂度,证明了机器人运动控制的稳定性;仿真结果表明该方法适用于大规模的机器人群,具有可扩展性。

References

- 1 Flocchini P, Prencipe G, Santoro N, Widmayer P. Gathering of asynchronous robots with limited visibility. *Theoretical Computer Science*, 2005, **337**(1-3): 147-168
- 2 Olfati-Saber R. Flocking for multi-agent dynamic systems: algorithms and theory. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2006, **51**(3): 401-420
- 3 Balch T, Hybinette M. Social potentials for scalable multi-robot formations. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. San Francisco, USA: IEEE, 2000. 73-80
- 4 Yuan M W, Jiang P. Social potentials based dynamic cooperation chain. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics, Automation and Mechatronics. Singapore, Singapore: IEEE, 2004. 136-140
- 5 Schneider F E, Wildermuth D. A potential field based approach to multi robot formation navigation. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics, Intelligent Systems and Signal Processing. Changsha, China: IEEE, 2003. 680-685
- 6 Fan W H, Liu Y H, Wang F, Cai X P. Multi-robot formation control using potential field for mobile Ad-Hoc networks. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Hong Kong, China: IEEE, 2005. 133-138
- 7 Fredslund J, Mataric M J. A general algorithm for robot formations using local sensing and minimal communication. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2002, **18**(5): 837-846
- 8 Gazi V, Passino K M. Stability analysis of swarms. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2003, **48**(4): 692-697
- 9 Gazi V, Passino K M. Stability analysis of social foraging swarms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2004, **34**(1): 539-557
- 10 Diestel R. *Graph Theory (Second Edition)*. New York: Springer-Verlag, 2000. 43-66
- 11 Wang Chao-Rui. *Graph Theory (Third Edition)*. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2004. 16-59 (王朝瑞. 图论 (第三版). 北京: 北京理工大学出版社, 2004. 16-59)



樊玮虹 国防科学技术大学电子科学与工程学院博士研究生。主要研究方向为无线传感器网络和多机器人系统。本文通信作者。E-mail: whfan@nudt.edu.cn
(**FAN Wei-Hong** Ph. D. candidate at the College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology. Her research interest covers wireless sensor networks and multi-robot system. Corresponding author of this paper.)



刘云辉 香港中文大学和国防科学技术大学教授。主要研究方向为机器视觉,无线传感器网络和机器人学。E-mail: yunhui.liu@gmail.com
(**LIU Yun-Hui** Professor at Chinese University of Hong Kong and National University of Defense Technology. His research interest covers machine vision, wireless sensor networks, and robotics.)



周东翔 国防科学技术大学电子科学与工程学院副教授。主要研究方向为多传感器数据融合和图像处理。E-mail: dxzhou@nudt.edu.cn
(**ZHOU Dong-Xiang** Associate professor at the College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology. His research interest covers multi-sensors data fusion and image processing.)



蔡宣平 国防科学技术大学电子科学与工程学院教授。主要研究方向为无线传感器网络和图像处理。E-mail: xpcai@nudt.edu.cn
(**CAI Xuan-Ping** Professor at the College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology. His research interest covers wireless sensor networks and image processing.)