ISSN 1000-9825, CODEN RUXUEW
Journal of Software, Vol.18, No.5, May 2007, pp.1152−1163
DOI: 10.1360/jos181152
© 2007 by *Journal of Software*. All rights reserved.
E-mail: jos@iscas.ac.cn
http://www.jos.org.cn
Tel/Fax: +86-10-62562563

基于虚拟势场的有向传感器网络覆盖增强算法*

陶 丹+, 马华东, 刘 亮

(智能通信软件与多媒体北京市重点实验室(北京邮电大学),北京 100876)

A Virtual Potential Field Based Coverage-Enhancing Algorithm for Directional Sensor Networks

TAO Dan+, MA Hua-Dong, LIU Liang

(Beijing Key Laboratory of Intelligent Telecommunications Software and Multimedia (Beijing University of Posts and Telecommunications), Beijing 100876, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-10-62282277, Fax: +86-10-62283523, E-mail: tdfxy@vip.sina.com, http://www.bupt.edu.cn

Tao D, Ma HD, Liu L. A virtual potential field based coverage-enhancing algorithm for directional sensor networks. *Journal of Software*, 2007,18(5):1152−1163. http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1152.htm

Abstract: Motivated by the directional sensing feature of video sensor, a direction adjustable sensing model is proposed first in this paper. Then, the coverage-enhancing problem in directional sensor networks is analyzed and defined. Moreover, a potential field based coverage-enhancing algorithm (PFCEA) is presented. By introducing the concept of "centroid", the pending problem is translated into the centroid points' uniform distribution problem. Centroid points repel each other to eliminate the sensing overlapping regions and coverage holes, thus enhance the whole coverage performance of the directional sensor network. A set of simulation results are performed to demonstrate the effectiveness of the proposed algorithm.
Key words: directional sensor network; directional sensing model; virtual potential field; coverage enhancement

摘 要: 首先从视频传感器节点方向性感知特性出发,设计了一种方向可调感知模型,并以此为基础对有向传感器网络覆盖增强问题进行分析与定义;其次,提出了一种基于虚拟势场的有向传感器网络覆盖增强算法 PFCEA (potential field based coverage-enhancing algorithm).通过引入"质心"概念,将有向传感器网络覆盖增强问题转化为质心均匀分布问题,以质心点作圆周运动代替传感器节点传感方向的转动.质心在虚拟力作用下作扩散运动,以消除网络中感知重叠区和盲区,进而增强整个有向传感器网络覆盖.一系列仿真实验验证了该算法的有效性.
关键词: 有向传感器网络;有向感知模型;虚拟势场;覆盖增强
中图法分类号: TP393 文献标识码: A

覆盖作为传感器网络中的一个基本问题,反映了传感器网络所能提供的"感知"服务质量.优化传感器网络

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.90612013 (国家自然科学基金); the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2006AA01Z304 (国家高技术研究发展计划(863)); the Program for New Century Excellent Talents in University of China under Grant No.NCET-04-0110 (新世纪优秀人才支持计划); the Beijing Natural Science Found under Grant No.4062024 (北京市自然科学基金)

Received 2007-01-01; Accepted 2007-03-05

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

覆盖对于合理分配网络的空间资源,更好地完成环境感知、信息获取任务以及提高网络生存能力都具有重要的意义[1].目前,传感器网络的初期部署有两种策略:一种是大规模的随机部署;另一种是针对特定的用途进行计划部署.由于传感器网络通常工作在复杂的环境下,而且网络中传感器节点众多,因此大都采用随机部署方式.然而,这种大规模随机投放方式很难一次性地将数目众多的传感器节点放置在适合的位置,极容易造成传感器网络覆盖的不合理(比如,局部目标区域传感器节点分布过密或过疏),进而形成感知重叠区和盲区.因此,在传感器网络初始部署后,我们需要采用覆盖增强策略以获得理想的网络覆盖性能.

目前,国内外学者相继开展了相关覆盖增强问题的研究,并取得了一定的进展[2−5].从目前可获取的资料来看,绝大多数覆盖问题研究都是针对基于全向感知模型(omni-directional sensing model)的传感器网络展开的[6],即网络中节点的感知范围是一个以节点为圆心、以其感知距离为半径的圆形区域.通常采用休眠冗余节点[2,7]、重新调整节点分布[8−11]或添加新节点[11]等方法实现传感器网络覆盖增强.

实际上,有向感知模型(directional sensing model)也是传感器网络中的一种典型的感知模型[12],即节点的感知范围是一个以节点为圆心、半径为其感知距离的扇形区域.由基于有向感知模型的传感器节点所构成的网络称为有向传感器网络.视频传感器网络是有向传感器网络的一个典型实例.感知模型的差异造成了现有基于全向感知模型的覆盖研究成果不能直接应用于有向传感器网络,迫切需要设计出一系列新方法.

在早期的工作中[13],我们率先开展有向传感器网络中覆盖问题的研究,设计一种基本的有向感知模型,用以刻画视频传感器节点的方向性感知特性,并研究有向传感器网络覆盖完整性以及通信连通性问题.同时,考虑到有向传感器节点传感方向往往具有可调整特性(比如 PTZ 摄像头的推拉摇移功能),我们进一步提出一种基于图论和计算几何的集中式覆盖增强算法[14],调整方案一经确定,网络中所有有向传感器节点并发地进行传感方向的一次性调整,以此获得网络覆盖性能的增强.但由于未能充分考虑到有向传感器节点局部位置及传感方向信息,因而,该算法对有向传感器网络覆盖增强的能力相对有限.

本文将基本的有向感知模型扩展为方向可调感知模型,研究有向传感器网络覆盖增强问题.首先定义了方向可调感知模型,并分析随机部署策略对有向传感器网络覆盖率的影响.在此基础上,分析了有向传感器网络覆盖增强问题.本文通过引入“质心”概念,将待解决问题转化为质心均匀分布问题,提出了一种基于虚拟势场的有向传感器网络覆盖增强算法 PFCEA(potential field based coverage-enhancing algorithm).质心在虚拟力作用下作扩散运动,逐步消除网络中感知重叠区和盲区,增强整个网络覆盖性能.最后,一系列仿真实验验证了 PFCEA 算法的有效性.

1 有向传感器网络覆盖增强问题

本节旨在分析和定义有向传感器网络覆盖增强问题.在此之前,我们对方向可调感知模型进行简要介绍.

1.1 方向可调感知模型

不同于目前已有的全向感知模型,方向可调感知模型的感知区域受“视角”的限制,并非一个完整的圆形区域.在某时刻 t,有向传感器节点具有方向性感知特性;随着其传感方向的不断调整(即旋转),有向传感器节点有能力覆盖到其传感距离内的所有圆形区域.由此,通过简单的几何抽象,我们可以得到有向传感器节点的方向可调感知模型,如图 1 所示.

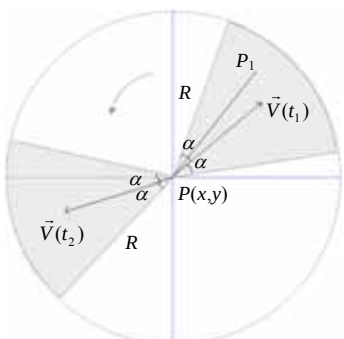


Fig.1 Directional adjustable sensing model

图 1 方向可调感知模型

定义 **1**. 方向可调感知模型可用一个四元组$\langle P,R,\vec{V}(t),\alpha\rangle$表示.其中,$P=(x,y)$表示有向传感器节点的位置坐标;$R$ 表示节点的最大传感范围,即传感半径;单位向量$\vec{V}(t)=(\vec{V}_x(t),\vec{V}_y(t))$为扇形感知区域的中轴线,即节点在某时刻 t 时的传感方向;$\vec{V}_x(t)$ 和 $\vec{V}_y(t)$ 分别是单位向量$\vec{V}(t)$在 X 轴和 Y 轴方向上的

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

投影分量;α表示边界距离传感向量$\vec{V}(t)$的传感夹角,2α代表传感区域视角,记作 FOV.

特别地,当$\alpha=\pi$时,传统的全向感知模型是方向可调感知模型的一个特例.

若点 P_1 被有向传感器节点 v_i 覆盖成立,记为 $v_i \to P_1$,当且仅当满足以下条件:

(1) $\|\overrightarrow{PP_1}\| \le R$,其中,$\|\overrightarrow{PP_1}\|$代表点 P_1 到该节点的欧氏距离;

(2) $\overrightarrow{PP_1}$与$\vec{V}(t)$间夹角取值属于$[-\alpha,\alpha]$.

判别点 P_1 是否被有向传感器节点覆盖的一个简单方法是:如果$\|\overrightarrow{PP_1}\| \le R$且$\overrightarrow{PP_1}\cdot\vec{V} \ge \|\overrightarrow{PP_1}\|\cdot\cos\alpha$,那么,点 P_1 被有向传感器节点覆盖;否则,覆盖不成立.另外,若区域 A 被有向传感节点覆盖,当且仅当区域 A 中任何一个点都被有向传感节点覆盖.除非特别说明,下文中出现的“节点”和“传感器节点”均满足上述方向可调感知模型.

1.2 有向传感器网络覆盖增强问题的分析与定义

在研究本文内容之前,我们需要作以下必要假设:

A1. 有向传感器网络中所有节点同构,即所有节点的传感半径(R)、传感夹角(α)参数规格分别相同;

A2. 有向传感器网络中所有节点一经部署,则位置固定不变,但其传感方向可调;

A3. 有向传感器网络中各节点都了解自身位置及传感方向信息,且各节点对自身传感方向可控.

假设目标区域的面积为 S,随机部署的传感器节点位置满足均匀分布模型,且目标区域内任意两个传感器节点不在同一位置.传感器节点的传感方向在$[0,2\pi]$上也满足均匀分布模型.在不考虑传感器节点可能落入边界区域造成有效覆盖区域减小的情况下,由于每个传感器节点所监控的区域面积为αR^2,则每个传感器节点能监测整个目标区域的概率为$\alpha R^2/S$.目标区域被 N 个传感器节点覆盖的初始概率 p_0 的计算公式为(具体推导过程参见文献[14])

$$p_0 = 1-\left(1-\frac{\alpha R^2}{S}\right)^N \tag{1}$$

由公式(1)可知,当目标区域内网络覆盖率至少达到 p_0 时,需要部署的节点规模计算公式为

$$N \ge \frac{\ln(1-p_0)}{\ln(S-\alpha R^2)-\ln S} \tag{2}$$

当网络覆盖率分别为 p_0 和 $p_0+\Delta p$ 时,所需部署的传感器节点数目分别为 $\ln(1-p_0)/\tau$,$\ln(1-(p_0+\Delta p))/\tau$.其中,$\tau=\ln(S-\alpha R^2)-\ln S$.因此,传感器节点数目差异$\Delta N$ 由公式(3)可得,

$$\Delta N = \ln\frac{1-(p_0+\Delta p)}{1-p_0}\Big/\tau \tag{3}$$

当目标区域面积 S、节点传感半径 R 和传感夹角α一定时,τ为一常数.此时,ΔN 与 p_0,Δp 满足关系如图 2 所示($S=500\times500\text{m}^2$,$R=60\text{m}$,$\alpha=45°$).从图中我们可以看出,当 p_0 一定时,ΔN 随着Δp 的增加而增加;当Δp 一定时,ΔN 随着 p_0 的增加而增加,且增加率越来越大.因此,当需要将覆盖率增大Δp 时,则需多部署ΔN 个节点(p_0 取值较大时(≥80%),Δp 取值每增加 1%,ΔN 就有数十、甚至数百的增加).如果采用一定的覆盖增强策略,无须多部署节点,就可以使网络覆盖率达到 $p_0+\Delta p$,大量节省了传感器网络部署成本.

设 $S_i(t)$表示节点 v_i 在传感向量为$\vec{V}_i(t)$时所覆盖的区域面积.运算操作 $S_i(t)\cup S_j(t)$代表节点 v_i 和节点 v_j 所能覆盖到的区域总面积.这样,当网络中节点传感向量取值为$(\vec{V}_1(t),\vec{V}_2(t),...,\vec{V}_N(t))$时,有向传感器网络覆盖率可表示如下:

$$p(\vec{V}_1(t),\vec{V}_2(t),...,\vec{V}_N(t)) = \bigcup_{i=1}^{N} S_i(t)\Big/S \tag{4}$$

因此,有向传感器网络覆盖增强问题归纳如下:

问题:求解一组$(\vec{V}_1^*(t),\vec{V}_2^*(t),...,\vec{V}_N^*(t))$,使得对于初始的$(\vec{V}_1(t),\vec{V}_2(t),...,\vec{V}_N(t))$,有 $p(\vec{V}_1^*(t),\vec{V}_2^*(t),...,\vec{V}_N^*(t))-p_0$ 取值接近最大.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

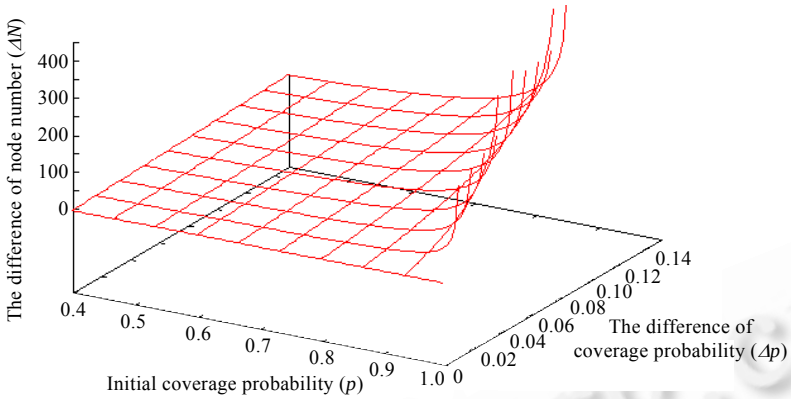


Fig.2 The relation among p_0, Δp and ΔN

图 2 p_0,Δp 和ΔN 三者之间的关系

2 基于虚拟势场的覆盖增强算法

2.1 传统虚拟势场方法

虚拟势场(virtual potential field)的概念最初应用于机器人的路径规划和障碍躲避.Howard 等人[8]和 Poduri 等人[9]先后将这一概念引入到传感器网络的覆盖增强问题中来.其基本思想是把网络中每个传感器节点看作一个虚拟的电荷,各节点受到其他节点的虚拟力作用,向目标区域中的其他区域扩散,最终达到平衡状态,即实现目标区域的充分覆盖状态.Zou 等人[15]提出了一种虚拟力算法(virtual force algorithm,简称 VFA),初始节点随机部署后自动完善网络覆盖性能,以均匀网络覆盖并保证网络覆盖范围最大化.在执行过程中,传感器节点并不移动,而是计算出随机部署的传感器节点虚拟移动轨迹.一旦传感器节点位置确定后,则对相应节点进行一次移动操作.Li 等人[10]为解决传感器网络布局优化,在文献[15]的基础上提出了涉及目标的虚拟力算法(target involved virtual force algorithm,简称 TIVFA),通过计算节点与目标、热点区域、障碍物和其他传感器之间的虚拟力,为各节点寻找受力平衡点,并将其作为该传感器节点的新位置.

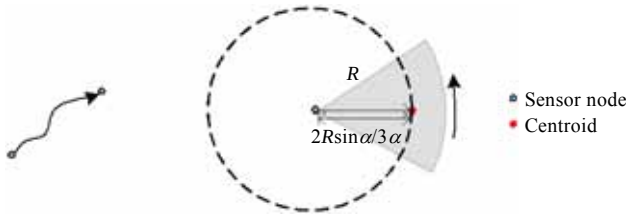
上述利用虚拟势场方法优化传感器网络覆盖的研究成果都是基于全向感知模型展开的.假定传感器节点间存在两种虚拟力作用:一种是斥力,使传感器节点足够稀疏,避免节点过于密集而形成感知重叠区域;另一种是引力,使传感器节点保持一定的分布密度,避免节点过于分离而形成感知盲区[15].最终利用传感器节点的位置移动来实现传感器网络覆盖增强.

2.2 基于虚拟势场的有向传感器网络覆盖增强算法

在实际应用中,考虑到传感器网络部署成本,所有部署的传感器节点都具有移动能力是不现实的.另外,传感器节点位置的移动极易引起部分传感器节点的失效,进而造成整个传感器网络拓扑发生变化.这些无疑都会增加网络维护成本.因而,本文的研究工作基于传感器节点位置不变、传感方向可调的假设.上述假设使得直接利用虚拟势场方法解决有向传感器网络覆盖增强问题遇到了麻烦.在传统的虚拟势场方法中,传感器节点在势场力的作用下进行平动(如图 3(a)所示),而基于本文的假设,传感器节点表现为其扇形感知区域在势场力的作用下以传感器节点为轴心进行旋转(如图 3(b)所示).

为了简化扇形感知区域的转动模型,我们引入“质心(centroid)”的概念.质心是质点系中一个特定的点,它与物体的平衡、运动以及内力分布密切相关.传感器节点的位置不变,其传感方向的不断调整可近似地看作是扇形感知区域的质心点绕传感器节点作圆周运动.如图 3(b)所示,一个均匀扇形感知区域的质心点位于其对称轴上且与圆心距离为 $2R\sin\alpha/3\alpha$.每个传感器节点有且仅有一个质心点与其对应.我们用 c 表示传感器节点 v 所对应的质心点.本文将有向传感器网络覆盖增强问题转化为利用传统虚拟势场方法可解的质心点均匀分布问题,如图 4 所示.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn



(a) Translational model (b) Rotational model

(a) 平动模型 (b) 转动模型

Fig.3 Moving models of sensor node

图 3 传感器节点的运动模型

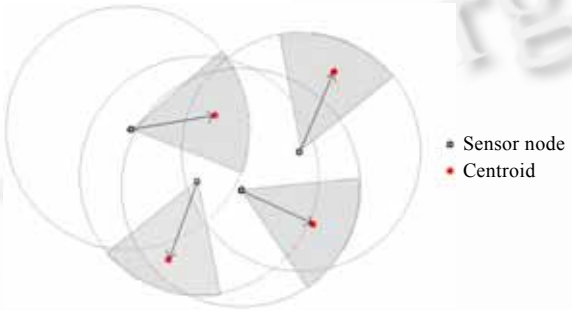


Fig.4 The issue description of coverage enhancement in directional sensor networks

图 4 有向传感器网络覆盖增强问题描述

2.2.1 受力分析

利用虚拟势场方法增强有向传感器网络覆盖,可以近似等价于质心点-质心点(c-c)之间虚拟力作用问题.我们假设质心点-质心点之间存在斥力,在斥力作用下,相邻质心点逐步扩散开来,在降低冗余覆盖的同时,逐渐实现整个监测区域的充分高效覆盖,最终增强有向传感器网络的覆盖性能.在虚拟势场作用下,质心点受来自相邻一个或多个质心点的斥力作用.下面给出质心点受力的计算方法.

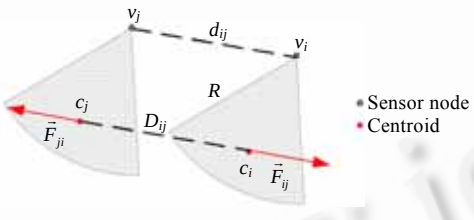


Fig.5 The repulsive force between two centroids

图 5 质心点-质心点间斥力作用

如图 5 所示,d_{ij} 表示传感器节点 v_i 与 v_j 之间的欧氏距离.只有当 d_{ij} 小于传感器节点传感半径(R)的 2 倍时,它们的感知区域才存在重叠的可能,故它们之间才存在产生斥力的作用,该斥力作用于传感器节点相应的质心点 c_i 和 c_j 上.

定义 2. 有向传感器网络中,欧氏距离不大于节点传感半径(R)2 倍的一对节点互为邻居节点.节点 v_i 的邻居节点集合记作 ψ_i.即 $\psi_i=\{v_j|Dis(v_i,v_j)\le 2R, i\ne j\}$.

我们定义质心点 v_j 对质心点 v_i 的斥力模型 $\vec{F}_{ij}$,见公式(5).

$$\vec{F}_{ij}=\begin{cases}(k_R/D_{ij}^2,\alpha_{ij}), & \text{if } v_j\in\psi_i\\ \vec{0}, & \text{otherwise}\end{cases} \tag{5}$$

其中,D_{ij} 表示质心点 c_i 和 c_j 之间的欧氏距离;k_R 表示斥力系数(常数,本文取 k_R=1);α_{ij} 为单位向量,指示斥力方向(由质心点 c_j 指向 c_i).公式(5)表明,只有当传感器节点 v_i 和 v_j 互为邻居节点时(即有可能形成冗余覆盖时),其相应的质心点 c_i 和 c_j 之间才存在斥力作用.质心点所受斥力大小与 c_i 和 c_j 之间的欧氏距离成反比,而质心点所受斥力方向由 c_i 和 c_j 之间的相互位置关系所决定.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

质心点 c_i 所受合力是其受到相邻 k 个质心点排斥力的矢量和.公式(6)描述质心点 c_i 所受合力模型 $\vec{F}_i$.

$$\vec{F}_i=\begin{cases}\sum_{j=1,j\neq i}^{k}\vec{F}_{ij}, & k\geq 1\\ \vec{0}, & k=0\end{cases} \tag{6}$$

通过如图 6 所示的实例,我们分析质心点的受力情况.图中包括 4 个传感器节点:v_1,v_2,v_3 和 v_4,其相应的质心点分别为 c_1,c_2,c_3 和 c_4.以质心点 c_1 为例,由于 $d_{12}>2R$,故 $\vec{F}_{12}=\vec{0}$,质心点 c_1 仅受到来自质心点 c_3 和 c_4 的斥力,其所受合力 $\vec{F}_1=\vec{F}_{13}+\vec{F}_{14}$.传感器节点传感方向旋转导致质心点的运动轨迹并不是任意的,而是固定绕传感器节点作圆周运动.因此,质心点的运动仅仅受合力沿圆周 Π 切线方向分量 $\vec{F}_T$ 的影响.

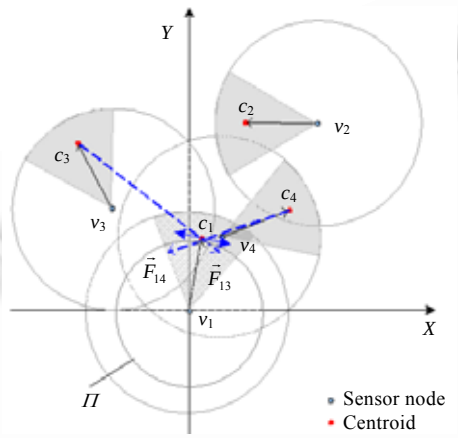


Fig.6 The force on centroid

图 6 质心点受力

2.2.2 控制规则(control law)

本文基于一个虚拟物理世界研究质心点运动问题,其中作用力、质心点等都是虚拟的.该虚拟物理世界的构建是建立在求解问题特征的基础上的.在此,我们定义控制规则,即规定质心点受力与运动之间的关系,以达到质心点的均匀分布.

质心点在 $\vec{F}_T$ 作用下运动,受到运动学和动力学的双重约束,具体表现如下:

(1) 运动学约束

在传统传感器网络中利用虚拟势场方法移动传感器节点的情况下,由于传感器节点向任意方向运动的概率是等同的,我们大都忽略其所受的运动学约束[8].而在转动模型中,质心点的运动不是任意方向的,受合力沿圆周 Π 切线方向分量 $\vec{F}_T$ 的影响,只能绕其传感器节点作圆周运动.

质心点在运动过程中受到的虚拟力是变化的,但对传感器网络系统来说,传感器节点之间每时每刻都交换邻居节点位置及传感方向信息是不现实的.因此,我们设定邻居节点间每隔时间步长 Δt 交换一次位置及传感方向信息,根据交换信息计算当前时间步长质心点所受合力,得出转动方向及弧长.同时,问题求解的目的在于将节点的传感方向调整至一个合适的位置.在此,我们不考虑速度和加速度与转动弧长之间的关系.

(2) 动力学约束

动力学约束研究受力与运动之间的关系.本运动模型中的动力学约束主要包含两方面内容:

- 每个时间步长 Δt 内,质心点所受合力与转动方向及弧长之间的关系;
- 质心点运动的静止条件.

在传统传感器网络中利用虚拟势场方法移动传感器节点的情况下,在每个时间步长内,传感器节点的运动速度受限于最大运动速度 $v_{\max}$,而不是随传感器节点受力无止境地增加.通过此举保证微调方法的快速收敛.在

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

本转动模型中,我们同样假设质心点每次固定以较小的转动角度进行转动,通过多次微调方法逐步趋向最优解,即在每个时间步长Δt 内,质心点转动的方向沿所受合力在圆周Π切线方向分量,转动大小不是任意的,而是具有固定转动角度$\Delta\theta$.采用上述方法的原因有两个:

- 运动过程中,质心点受力不断变化,且变化规律很难用简单的函数进行表示,加之上述运动学约束和问题特征等因素影响,我们很难得出一个简明而合理的质心点所受合力与转动弧长之间的关系.
- 运动过程中,质心点按固定角度进行转动,有利于简化计算过程,减少节点的计算负担.同时,我们通过分析仿真实验数据发现,该方法具有较为理想的收敛性(具体讨论参见第 3.2 节).

固定转动角度$\Delta\theta$取值不同对 PFCEA 算法性能具有较大的影响,这在第 3.3 节中将加以详细的分析和说明.

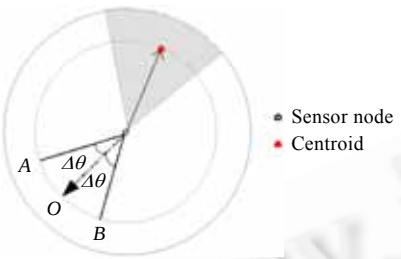


Fig.7 The vibration of centroid

图 7 质心点振动

当质心点所受合力沿圆周Π切线方向分量为 0 时,其到达理想位置转动停止.如图 7 所示,我们假定质心点在圆周Π上 O 点处合力切向分量为 0.由于质心点按固定转动角度进行转动,因此,它未必会刚好转动到 O 点处.当质心点处于图 7 中弧$\overset{\frown}{AO}$或$\overset{\frown}{OB}$时,会因合力切向分量不为 0 而导致质心点围绕 O 点附近往复振动.因此,为避免出现振动现象,加速质心点达到稳定状态,我们需要进一步限定质心点运动的停止条件.

当质心点围绕 O 点附近往复振动时,其受合力的切向分量很小.因此,我们设定受力门限ε,当$\|\vec{F}_T\|\le\varepsilon$ (本文取ε=10e−6),即可认定质心点已达到稳定状态,无须再运动.经过数个时间步长Δt 后,当网络中所有质心点达到稳定状态时,整个传感器网络即达到稳定状态,此时对应的一组$(\vec{V}_1(t),\vec{V}_2(t),...,\vec{V}_N(t))$,该组解通常为本文覆盖增强的较优解.

2.3 算法描述

基于上述分析,本文提出了基于虚拟势场的网络覆盖增强算法(PFCEA),该算法是一个分布式算法,在每个传感器节点上并发执行.PFCEA 算法描述如下:

输入:节点 v_i 及其邻居节点的位置和传感方向信息.

输出:节点 v_i 最终的传感方向信息$\vec{V}(t)$.

1. $t\leftarrow 0$; //初始化时间步长计数器
2. 计算节点 v_i 相应质心点 c_i 初始位置 $P_{c_i}(t)$;
3. 计算节点 v_i 邻居节点集合ψ_i,M 表示邻居节点集合中元素数目;
4. While (1)
   - 4.1 $t\leftarrow t+1$;
   - 4.2 $\vec{F}_i(t)\leftarrow\vec{0}$;
   - 4.3 For (j=0; j<M; j++)
     - 4.3.1 计算质心点 c_j 对 c_i 的当前斥力$\vec{F}_{ij}(t)$,其中,$v_j\in\psi_i$;
     - 4.3.2 $\vec{F}_i(t)\leftarrow\vec{F}_i(t)+\vec{F}_{ij}(t)$;
   - 4.4 计算质心点 c_i 当前所受合力$\vec{F}_i(t)$ 沿圆周Π切线分量$\vec{F}_T(t)$;
   - 4.5 确定质心点 c_i 运动方向;
   - 4.6 If ($\|\vec{F}_T\|\ge\varepsilon$) Then
     - 4.6.1 质心点 c_i 沿$\vec{F}_T(t)$ 方向转动固定角度$\Delta\theta$;
     - 4.6.2 调整质心点 c_i 至新位置 $P_{c_i}(t)$;
     - 4.6.3 计算节点 v_j 指向当前质心点 c_i 向量并单位化,得到节点 v_i 最终的传感方向信息$\vec{V}(t)$;
   - 4.7 Sleep (Δt);

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

5. End.

3 算法仿真与性能分析

我们利用 VC6.0 自行开发了适用于传感器网络部署及覆盖研究的仿真软件 Senetest2.0,并利用该软件进行了大量仿真实验,以验证 PFCEA 算法的有效性.实验中参数的取值见表 1.为简化实验,假设目标区域中所有传感器节点同构,即所有节点的传感半径及传感夹角规格分别相同.

Table 1 Experimental parameters

表 1 实验参数

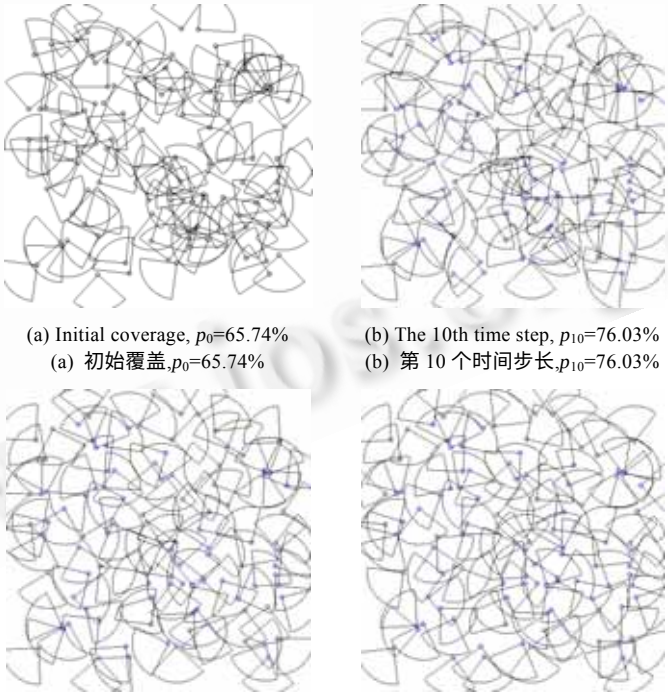
Parameter	Variation
Target area S	$500\times500\text{m}^2$
Area coverage p	0~1
Sensor number N	0~250
Sensing radius R_s	0~100m
Sensing offset angel α	0º~90º

3.1 实例研究

在本节中,我们通过一个具体实例说明 PFCEA 算法对有向传感器网络覆盖增强.在 $500\times500\text{m}^2$ 的目标区域内,我们部署传感半径 R=60m、传感夹角α=45º的传感器节点完成场景监测.若达到预期的网络覆盖率 p=70%,通过公式(1),我们可预先估算出所需部署的传感器节点数目,

$$N=\frac{\ln(1-0.70)}{\ln(250000-0.25\pi\times60\times60)-\ln(250000)}\approx105\ .$$

针对上述实例,我们记录了 PFCEA 算法运行不同时间步长时有向传感器网络覆盖增强情况,如图 8 所示.



(a) Initial coverage, p_0=65.74%
(a) 初始覆盖,p_0=65.74%

(b) The 10th time step, p_{10}=76.03%
(b) 第 10 个时间步长,p_{10}=76.03%

(c) The 20th time step, p_{20}=80.20%
(c) 第 20 个时间步长,p_{20}=80.20%

(d) The 30th time step, p_{30}=81.45%
(d) 第 30 个时间步长,p_{30}=81.45%

Fig.8 Coverage enhancement using PFCEA algorithm

图 8 PFCEA 算法实现覆盖增强

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

直观看来,质心点在虚拟斥力作用下进行扩散运动,逐步消除网络中感知重叠区和盲区,最终实现有向传感器网络覆盖增强.此例中,网络传感器节点分别经过 30 个时间步长的调整,网络覆盖率由最初的 65.74%提高到 81.45%,网络覆盖增强达 15.71 个百分点.

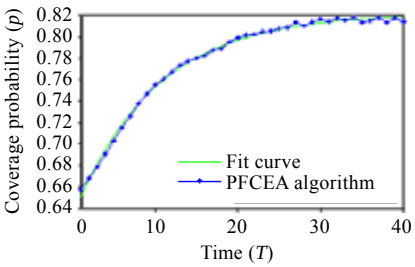


Fig.9 A case of coverage enhancement

图 9 覆盖增强实例

图 9 显示了逐个时间步长调整所带来的网络覆盖增强.我们发现,随着时间步长的增加,网络覆盖率也不断增加,且近似满足指数关系.当时间步长达到 30 次以后,网络中绝大多数节点的传感方向出现振动现象,直观表现为网络覆盖率在 81.20%附近在允许的范围振荡.此时,我们认定有向传感器网络覆盖性能近似增强至最优.

网络覆盖性能可以显著地降低网络部署成本.实例通过节点传感方向的自调整,在仅仅部署 105 个传感器节点的情况下,最终获得 81.45%的网络覆盖率.若预期的网络覆盖率为 81.45%,通过公式(1)的计算可知,我们至少需要部署 148 个传感器节点.由此可见,利用 PFCEA 算法实现网络覆盖增强的直接效果是可以节省近 43 个传感器节点,极大地降低了网络部署成本.

3.2 收敛性分析

为了讨论本文算法的收敛性,我们针对 4 种不同的网络节点规模进行多组实验.我们针对各网络节点规模随机生成 10 个拓扑结构,分别计算算法收敛次数,并取平均值,实验数据见表 2.其他实验参数为 R=60m,α=45º,$\Delta\theta$=5º.

Table 2 Experimental data for convergence analysis

表 2 实验数据收敛性分析

	N	$\bar{p}_0$ (%)	$\bar{p}$ (%)	$\bar{T}$
1	50	41.28	52.73	24
2	70	52.74	64.98	21
3	90	60.76	73.24	28
4	110	65.58	78.02	27

分析上述实验数据,我们可以得出,PFCEA 算法的收敛性即调整的次数,并不随传感器网络节点规模的变化而发生显著的改变,其取值一般维持在[20,30]范围内.由此可见,本文 PFCEA 算法具有较好的收敛性,可以在较短的时间步长内完成有向传感器网络的覆盖增强过程.

3.3 仿真分析

在本节中,我们通过一系列仿真实验来说明 4 个主要参数对本文 PFCEA 算法性能的影响.它们分别是:节点规模 N、传感半径 R、传感夹角α和(质心点)转动角度$\Delta\theta$.针对前 3 个参数,我们与以往研究的一种集中式覆盖增强算法[14]进行性能分析和比较.

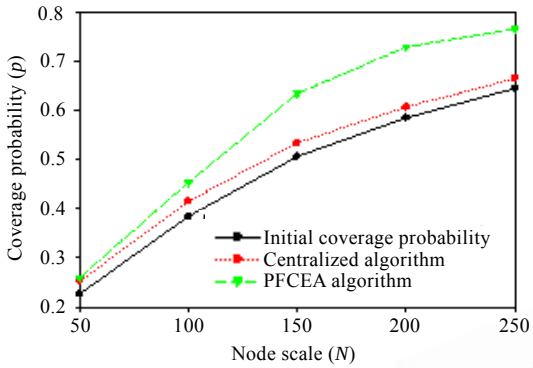
A. 节点规模 N、传感半径 R 以及传感角度α

我们分别取不同节点规模进行仿真实验.从图 10(a)变化曲线可以看出,当 R 和α一定时,N 取值较小导致网络初始覆盖率较小.此时,随着 N 的增大,Δp 取值呈现持续上升趋势.当 N=200 时,网络覆盖率增强可达 14.40 个百分点.此后,Δp 取值有所下降.这是由于当节点规模 N 增加导致网络初始覆盖率较高时(如≥60%),相邻多传感器节点间形成覆盖盲区的概率大为降低,无疑削弱了 PFCEA 算法的性能.另外,部分传感器节点落入边界区域,也会间接起到削弱 PFCEA 算法性能的作用.

另外,传感半径、传感角度对 PFCEA 算法性能的影响与此类似.当节点规模一定时,节点传感半径或传感角度取值越小,单个节点的覆盖区域越小,各相邻节点间形成感知重叠区域的可能性也就越小.此时,PFCEA 算法对网络覆盖性能改善并不显著.随着传感半径或传感角度的增加,Δp 不断增加.当 R=70m 且α=45º时,网络覆盖率

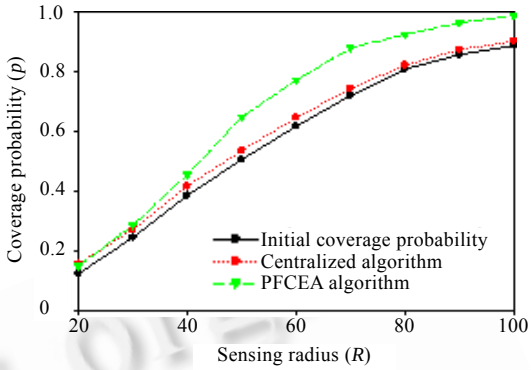
© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

最高可提升 15.91%.但随着传感半径或传感角度取值的不断增加,PFCEA 算法带来的网络覆盖效果降低,如图 10(b)、图 10(c)所示.



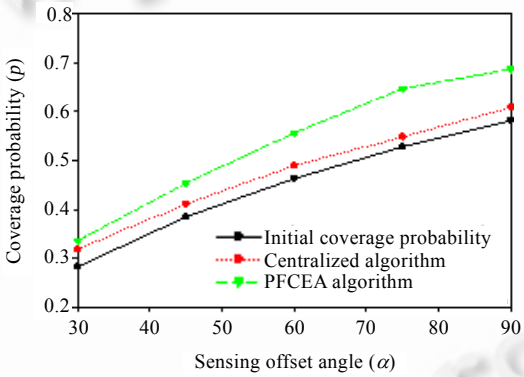
(a) The effect of node scale N, other parameters meet R=40m, α=45º, $\Delta\theta$=5º

(a) 节点规模 N 的影响,其他实验参数满足: R=40m,α=45º,$\Delta\theta$=5º



(b) The effect of sensing radius R, other parameters meet N=100, α=45º, $\Delta\theta$=5º

(b) 传感半径 R 的影响,其他实验参数满足: N=100,α=45º,$\Delta\theta$=5º



(c) The effect of sensing offset angle α, other parameters meet N=100, R=40m, $\Delta\theta$=5º

(c) 传感角度α的影响,其他实验参数满足:N=100,R=40m,$\Delta\theta$=5º

Fig.10 The effect of key parameters on PFCEA algorithm performance

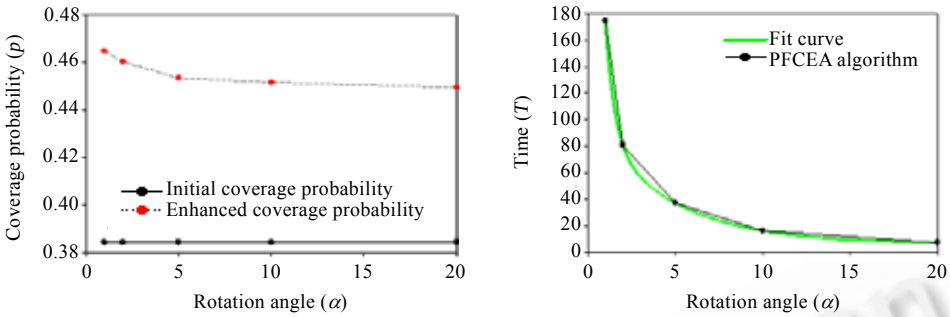
图 10 主要参数对 PFCEA 算法性能的影响

从图 10 的实验数据来看,较之本文提出的 PFCEA 算法,文献[15]中集中式算法性能对于节点规模、传感半径以及传感角度等参数的变化不敏感.另外,在参数取值相同的情况下,该集中式算法对网络覆盖性能增强相对有限(覆盖率增强仅为数个百分点);PFCEA 算法性能明显占优.

B. 转动角度$\Delta\theta$

转动角度$\Delta\theta$用以刻画质心点在每个时间步长的转动幅度.图 11(a)显示,当转动角度分别取 1º,2º,5º,10º,20º 时,对于仿真实例 N=100,R=40m,α=45º,p_0=38.46%,网络覆盖增强的比较.从变化曲线可以看出,转动角度取值越小,PFCEA 算法覆盖增强效果越好.当转动角度分别为 1º和 20º时,网络覆盖率增强分别为 8.02%和 6.49%.显然,当转动角度为 1º时,质心点在每个时间步长转动较小,相对应的节点传感方向调整精准度较高,逼近较优解的可能性也就较大.但转动角度取值过小也会引起时间步长的线性增加,从而推迟整个网络稳定状态的到来(如图 11(b)所示).因此,转动角度选取要适中,既要避免取值过小引起调整精准度降低,又要避免取值过大引起的频繁计算和传感方向调整.本文折衷转动角度取值对网络覆盖增强和时间步长两方面的影响,仿真实验选取转动角度$\Delta\theta$=5º.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn



(a) The effect on coverage enhancement

(a) 对覆盖增强的影响

(b) The effect on time step

(b) 对时间步长的影响

Fig.11 The effect of rotation angle on PFCEA algorithm performance

图 11 转动角度对 PFCEA 算法性能的影响

4 结束语

本文基于方向可调感知模型,研究有向传感器网络覆盖增强问题,提出一种基于虚拟势场的有向传感器网络覆盖增强算法(PFCEA).通过引入“质心”概念,将有向传感器网络覆盖增强问题转化为质心均匀分布问题.质心点在虚拟力作用下作排斥扩散运动,逐渐消除网络中感知重叠区和盲区,进而实现整个有向传感器网络覆盖增强.最后,我们通过一系列仿真实验说明本文所提出的 PFCEA 算法的有效性,并详述几种重要参数对 PFCEA 算法性能的影响.实验表明,本文的方法可以利用较小的网络部署成本获得较为理想的网络覆盖性能.当目标区域中传感器节点数目众多时,本文算法虽然可以改善网络覆盖性能,但对于调整后仍存在的覆盖冗余没有考虑,这将作为我们下一步的研究工作.

References:

[1] Ren Y, Zhang SD, Zhang HK. Theories and algorithms of coverage control for wireless sensor networks. Journal of Software, 2006, 17(3):422−433 (in Chinese with English abstract). http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/422.htm

[2] Ye F, Zhong G, Lu S, Zhang L. Energy efficient robust sensing coverage in large sensor networks. Technical Report, UCLA, 2002. http://www.cs.ucla.edu/yefan

[3] Meguerdichian S, Koushanfar F, Potkonjak M, Srivastava MB. Coverage problems in wireless ad-hoc sensor network. In: Sengupta B, ed. Proc. of the IEEE INFOCOM. Anchorage: IEEE Press, 2001. 1380−1387.

[4] Huang CF, Tseng YC. The coverage problem in a wireless sensor network. In: Sivalingam KM, Raghavendra CS, eds. Proc. of the ACM Int’l Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA). New York: ACM Press, 2003. 115−121.

[5] Cortes J, Martinez S, Karatas T, Bullo F. Coverage control for mobile sensing networks. IEEE Trans. on Robotics and Automation, 2004,20(2):243−255.

[6] MA HD, Tao D. Multimedia sensor network and its research progresses. Journal of Software, 2006,17(9):2013−2028 (in Chinese with English abstract). http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/2013.htm

[7] Tian D, Georganas ND. A node scheduling scheme for energy conservation in large wireless sensor network. Wireless Communications and Mobile Computing, 2003,3(2):271−290.

[8] Howard A, Matarić MJ, Sukhatme GS. Mobile sensor network deployment using potential field: A distributed scalable solution to the area coverage problem. In: Proc. of the 6th Int’l Symp. on Distributed Autonomous Robotics Systems (DARS 2002). 2002. 299−308. http://cres.usc.edu/pubdb_html/files_upload/71.pdf

[9] Poduri S, Sukhatme GS. Constrained coverage for mobile sensor networks. In: Tarn TJ, Fukuda T, eds. Proc. of the 2004 IEEE Int’l Conf. on Robotics & Automation. New York: IEEE Press, 2004. 165−171.

[10] Li SJ, Xu CF, Wu ZH, Pan YH. Optimal deployment and protection strategy in sensor network for target tracking. Acta Electronica Sinica, 2006,34(1):71−76 (in Chinese with English abstract).

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[11] Ghosh A. Estimating coverage holes and enhancing coverage in mixed sensor networks. In: Jha S, Hassanein H, eds. Proc. of the 29th Annual IEEE Int'l Conf. on Local Computer Networks. New York: IEEE Press, 2004. 68−76.

[12] Ma HD, Liu YH. Correlation based video processing in video sensor networks. In: Proc. of the 2005 Int'l Conf. on Wireless Networks, Communications and Mobile Computing. New York: IEEE Press, 2005. 987−992.

[13] Ma HD, Liu YH. On coverage problems of directional sensor networks. In: Jia XH, Wu J, He YX, eds. Proc. of the Int'l Conf. on Mobile Ad-Hoc and Sensor Networks. Berlin: Springer-Verlag, 2005. 721−731.

[14] Tao D, Ma HD, Liu L. Coverage-Enhancing algorithm for directional sensor networks, In: Stojmenovic I, Cao JN, eds. Proc. of the 2nd Int'l Conf. on Mobile Ad-Hoc and Sensor Networks. Berlin: Springer-Verlag, 2006. 256−267.

[15] Zou Y, Chakrabarty K. Sensor deployment and target localization in distributed sensor networks. ACM Trans. on Embedded Computing Systems, 2004,3(1):61−91.

附中文参考文献:

[1] 任彦,张思东,张宏科.无线传感器网络中覆盖控制理论与算法.软件学报,2006,17(3):422−433. http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/422.htm

[6] 马华东,陶丹.多媒体传感器网络及其研究进展.软件学报,2006,17(9):2013−2028. http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/2013.htm

[10] 李石坚,徐从富,吴朝晖,潘云鹤.面向目标跟踪的传感器网络布局优化及保护策略.电子学报,2006,34(1):71−76.

陶丹(1978－),女,吉林省吉林市人,博士生,主要研究领域为多媒体,传感器网络.

刘亮(1982－),男,博士生,主要研究领域为多媒体,传感器网络.

马华东(1964－),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为多媒体网络与系统,传感器网络,网格计算,形式化技术.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn