

视频传感器网络中无盲区监视优化*

蒋一波¹⁺, 王万良¹, 陈伟杰², 郑建炜¹, 姚信威²

¹(浙江工业大学 计算机科学与技术学院, 浙江 杭州 310023)

²(浙江工业大学 信息工程学院, 浙江 杭州 310023)

Coverage Optimization of Occlusion-Free Surveillance for Video Sensor Networks

JIANG Yi-Bo¹⁺, WANG Wan-Liang¹, CHEN Wei-Jie², ZHENG Jian-Wei¹, YAO Xin-Wei²

¹(College of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

²(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

+ Corresponding author: E-mail: jyb106@zjut.edu.cn, <http://www.zjut.edu.cn>

Jiang YB, Wang WL, Chen WJ, Zheng JW, Yao XW. Coverage optimization of occlusion-free surveillance for video sensor networks. *Journal of Software*, 2012, 23(2): 310-322. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3975.htm>

Abstract: This paper studies the problem of surveillance area of WVSN (wireless video sensor network) with obstacles, which is finding the optimized view-orientations for all video sensors to maximize multimedia coverage. In this paper, the characteristics of direction adjustable sensing model are discussed and the relation between sensors and obstacles is analyzed. Then, a coverage enhancement algorithm PFOFSA (potential field based occlusion-free surveillance algorithm) is proposed, which could effectively minimize the negative effect of occlusion and overlapping in the sensing field. In PFOFSA, three kinds of virtual centroid point are defined for simplifying the structure of effective region, occlusion region and overlapping region. Two kinds of relationship between virtual force and orientation rotation are constructed and made comparison in experiments. Finally, a set of simulation results are performed to demonstrate the effectiveness of PFOFSA. According to the experiments, PFOFSA could maximize the coverage of WVSN with obstacles and make higher coverage rate than other algorithms.

Key words: wireless video sensor network; occlusion-free surveillance; video coverage

摘要: 针对监控区域存在障碍物的情况,从无线视频传感节点的有向感知特性出发,讨论了视频传感器网络覆盖效果与监控区域之间的相互关系.在此基础上,定义了视频传感器网络的无盲区覆盖模型.基于虚拟势场的工作原理,提出了一种适用于无盲区覆盖模型的覆盖率动态优化算法 PFOFSA(potential field based occlusion-free surveillance algorithm).设计了 PFOFSA 中虚拟力的相互作用方法与监控节点运动规则,通过监控区域、重叠区域和遮挡区域之间的相互作用,逐步消除网络中的感知重叠区和盲区,优化视频无线传感器网络的覆盖率.最后,通过一系列的仿真实验分析了不同监控区域参数对 PFOFSA 算法的影响,验证了算法的有效性.

关键词: 无线视频传感器网络;无盲区监视;视频覆盖

* 基金项目: 国家自然科学基金(61070043); 浙江省自然科学基金(Y1100611)

收稿时间: 2010-01-14; 修改时间: 2010-10-29; 定稿时间: 2010-12-09

CNKI 网络优先出版: 2011-03-21 16:09, <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2560.TP.20110321.1609.001.html>

中图法分类号: TP393

文献标识码: A

现今,由于无线视频传感器具备安装方便、成本低、无须布线等优点,已显现出代替有线视频监控点的趋势.尽管无线视频传感器网络日趋成熟,但如何使监控网络更有效地覆盖整个监控区域的研究还比较少,这直接影响到视频监控系统对监控区域管理的有效性.目前,传感器网络的初期部署一般采用两种策略:(1) 大规模地随机部署;(2) 针对特定的用途进行有计划的部署.传感器网络通常在复杂的环境下工作,且网络中节点较多,工程操作时通常采用随机部署方式.这种大规模随机部署方式很难一次性地将网络中各个传感节点部署在合适的位置,极易产生不合理的覆盖结构,形成感知重叠和盲区.因此,在传感器网络初始部署后,对其网络覆盖结构进行优化是非常有意义的.

覆盖增强作为传感器网络中的一个基本问题,众多国内外学者相继开展了这方面的研究^[1-3].在大多数针对无线传感器网络的覆盖研究中,都采用相同的前提与假定,即传感器网中的传感节点均为全向感知模型(omni-directional sensing model)^[4-6].然而,全向感知性模型并不符合无线视频传感器网络的监控特性,因此现有的节点覆盖控制研究成果不能直接应用于无线视频传感器网络,迫切需要设计出适应应该问题的新方法来解决其覆盖问题.于是,出现了专门针对无线视频传感器网络的覆盖研究^[7-12].

在各种解决传感器网络覆盖问题的方法中,虚拟势场(potential field)是典型的方法之一. Howard 等人^[13]和 Poduri 等人^[14]先后将运动机器人路径规划中的虚拟势场方法引入到传感器网络的覆盖增强问题中来. Zou 等人^[15]提出了基于虚拟力算法的网络覆盖算法,从而在随机部署完成后优化网络覆盖性能.现在,虚拟势场已经在无线传感网的网络部署规划中取得了较好的效果,文献[16]将虚拟力导向微粒群优化应用于传感网布局问题,文献[12]将虚拟势场应用于有向传感网络的路径覆盖增强问题,都取得了较好的效果.利用虚拟势场方法时,假定节点间存在两种虚拟力,即斥力和引力.其中,斥力使节点足够稀疏,避免过分密集的节点造成感知重叠区域;引力使节点保持一定的密度,避免过于分离而形成感知盲区,最终利用节点的位置变化优化传感器网络的覆盖性能.

现有研究认为,视频传感器是一种有向感知模型(directional sensing model),即节点的感知范围是一个以节点为圆心、感知距离为半径的扇形区域.由基于有向感知模型的视频传感节点所构成的网络称为视频传感器网络.另外,监控区域情况多变、复杂,通常会有多个大型障碍物(如图 1 所示),直接导致监控盲区的产生.如何动态地优化视频传感器的监视方向成了亟需解决的棘手问题.

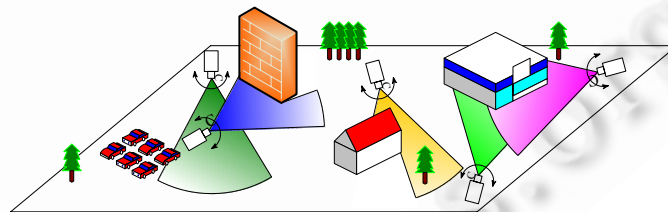


Fig.1 Surveillance area of wireless video sensor network with obstacles

图 1 包含障碍物的视频传感网络监控区域

在对无线视频传感器网络的覆盖研究中,文献[9]中提出了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“扇形的质心”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,能够有效地消除覆盖重叠区域.PFCEA 算法在监控区域无障碍情况下能够大幅度提高覆盖率.文献[10]针对无障碍的有向传感器网络区域覆盖问题研究了最大有向区域覆盖问题 MDAC(maximum directional area coverage),提出了分布式贪心算法来优化覆盖率.文献[11]研究了无线视频传感器网络中的节点监视方向的自主调整技术 SOA(self-orientation algorithm),所提出的方法可适应监控环境中存在障碍物的情况,能够在多个监控节点之间通过消息交互来调整监视方向,从而提高监控覆盖区域.

本文将针对存在障碍物的被监控区域,首先讨论视频传感器的有向感知性与区域中障碍物之间的相互影

响关系.在此基础上定义视频传感器网络的无盲区覆盖模型,并基于虚拟势场的工作原理设计一种适用于无盲区覆盖模型的受力与运动算法 PFOFSA(potential field based occlusion-free surveillance algorithm).通过监控区域、重叠区域和遮挡区域之间虚拟力的相互作用,逐步消除网络中感知重叠区和盲区,增加无线传感器网络的覆盖率.最后,通过一系列的仿真实验来验证 PFOFSA 算法的有效性.

1 监控区域无盲区覆盖问题描述

本节将分析视频传感节点的有向感知性及监控区域中障碍物对网络覆盖的影响,并定义无盲区覆盖的动态优化问题.

1.1 视频传感节点的有向感知性

分析视频传感节点的特点,可知其不同于目前已有的全向感知模型.此类节点可以主动调节其感知区域,即通过调整自身监视方向来改变覆盖区域.在任一时刻 t ,节点的覆盖区域不是一个完整的圆形,而是以其传感方向为中心、有效监控距离为半径的一个扇形区域,如图 2 所示.在 $t+1$ 时刻,视频传感节点可以调整其监视方向,

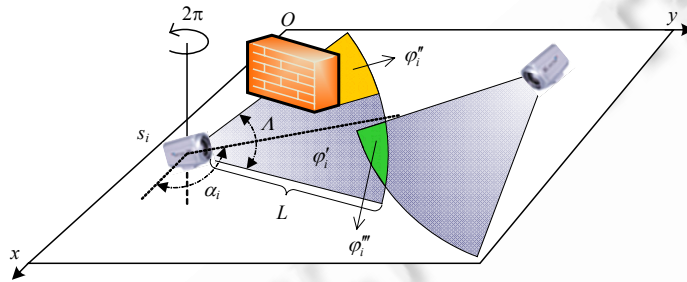


Fig.2 Two dimensional field of view of a video sensor node

图 2 视频传感节点的二维视角图

从而覆盖其余的扇形区域.

另外,在视频传感节点中,通常采用低分辨率摄像机.文献[17]认为,对大多数无线视频传感器网络来说,低分辨率的有向摄像机节点就能满足监控要求,而且 320×240 的图像分辨率即能满足一般的图像识别应用.因此,本文采用该假定,即视频传感节点的有效监控距离较短,其监控覆盖区域扇形的半径较小,网络整体监控需求将通过所有节点间的协同来完成.

定义 1. 包含 n 个视频监控节点的无线视频传感器网络表示为 $S=\{s_1,s_2,\dots,s_n\}$,可部署该网络的监控区域为 ψ .

定义 2. 视频传感节点 s_i 可由五元组 (x_i,y_i,α_i,A,L) 表示,其中 x_i 和 y_i 表示节点在区域 ψ 中的平面位置, α_i 表示节点的监视方向(摄像机正对方向与监控区域边的夹角弧度), A 为节点视角宽度的弧度值, L 为能够获得清晰图像的有效监控距离.

特别地,当 $A=2\pi$ 时,视频传感器网络等价与传统全向感知器模型.在无遮挡情况下,视频传感节点 s_i 所能覆盖的监控区域为 φ_i ,且 $\varphi_i = \frac{1}{2}AL^2$.

1.2 遮盖与重叠区域的定义与分析

在实际监控区域中,通常存在 1 个或多个障碍物,且障碍物能对视频传感器的监控范围进行遮挡.此外,多个视频传感节点的覆盖区域之间也会存在相互重叠的区域.因此,节点的监控区域覆盖范围关系如图 2 所示.

定义 3. 由视频监控区域中出现的障碍物所构成的集合记为 B ,且区域中的点 $P(x,y)\in B$ 均能遮挡与其相交的视频监控区域.

定义 4. 如果节点 s_i 的监控区域受到障碍物遮挡,即区域 ψ 中 $\exists B \cap \varphi_i \neq \emptyset$,则称被遮挡区域为 φ_i'' .

定义 5. 如果节点 s_i 的覆盖区域与其他节点的覆盖区域发生重叠,则重叠部分为 φ_i''' ,且

$$\varphi_i''' = \bigcup_{j=1, j \neq i}^n ((\varphi_i - \varphi_i'') \cap (\varphi_j - \varphi_j''))$$

于是,可设节点 s_i 的有效覆盖区域为 φ_i' ,且 $\varphi_i' = \varphi_i - \varphi_i'' - \varphi_i'''$.

对节点 s_i 来说,需要了解周边一定范围内其他节点的信息,包括位置信息和监视方向信息.因此,设节点 s_i 探测周围信息的区域为 $d(s_i)$,则 $d(s_i) = \{P(x, y) \mid \overline{P(x_i, y_i)P(x, y)} \leq 2L\}$.

1.3 无盲区覆盖动态优化问题描述

在本文的研究中作以下必要假设:(a) 视频传感器网络中的所有节点同构,即所有节点的视角宽度 Δ 、有效监控距离 L 均相同;(b) 网络中的视频传感器初始部署后,其位置固定不变,但是监视方向 α_i 可调;(c) 视频传感器节点所知信息包括:自身所在位置和监视方向、周边其余节点的位置与监视方向.

设 t 时刻视频传感器网络对监控区域的覆盖率为 r ,则

$$r = \frac{\iint_{x,y} \left(\bigcup_{i=1}^n \phi_i' \cup \phi_i'' \right)}{\iint_{x,y} \psi} \times 100\%, P(x, y) \in B \quad (1)$$

通过区域覆盖率 r ,可以对任意时刻的网络覆盖的有效性进行评估. r 的取值范围为 $[0,1]$, r 数值越大,说明网络中节点的部署结构越好.当 $t=0$ 时,在监控区域随机部署传感节点,随机部署位置满足平均分布,此时可得初始覆盖率 r_0 .本文所提出的算法的目标是,在 $t=0$ 初始部署之后,调整传感器网络中各个节点的监视方向,逐步提高监控区域的覆盖率.

因此,所研究的算法是一个寻找传感器网络中节点监控方向的最优或较优覆盖方案,可将求解问题归纳如下:在监控区域 ψ 和障碍物集合 B 确定的情况下,随机部署一组位置满足均匀分布的传感节点后,寻找一个传感器监视方向设置方案 $\{s_1(\alpha_1)^*, s_2(\alpha_2)^*, \dots, s_n(\alpha_n)^*\}$,使得该设置方案对于任意的其他方案 $\{s_1(\alpha_1), s_2(\alpha_2), \dots, s_n(\alpha_n)\}$, 都具备更高的覆盖率,即 $r^* \geq r$.

2 基于虚拟势场的无盲区覆盖动态优化算法

在前文定义的基础上,本节引入虚拟势场的方法来解决存在障碍物的视频传感器网络覆盖优化问题.

2.1 虚拟势场方法的引入与质心设计

虚拟势场方法是解决传感器网络覆盖控制问题的典型方法之一.通过虚拟引力和虚拟斥力的相互作用,动态调节各节点间的相对位置,最终优化传感器网络的覆盖性能.

根据前文的分析,视频传感器网络中的节点均不具备移动平面位置的能力,此时,网络通信拓扑就处于固定状态,可以着手优化视频的覆盖率问题.在引入虚拟势场方法时,传感节点间的力将不会导致位置移动,而仅会导致传感器的监视方向围绕节点中心位置发生旋转.

因为本文所研究的监控区域中存在障碍物,所以针对不同的监控区域来设定不同的质心,可设非空指定区域 ϕ 的质心点为 $c(\phi)$.为简化实际计算过程,对质心点位置求解方式进行离散化处理,可得:

$$c(\phi) = P \left(\frac{\sum_{P(x,y) \in \phi} x}{\text{count}(\phi)}, \frac{\sum_{P(x,y) \in \phi} y}{\text{count}(\phi)} \right) \quad (2)$$

其中,函数 $\text{count}(\phi)$ 表示取区域 ϕ 中离散点的个数.

根据公式(2),可计算得到节点 s_i 的有效监控区域的质心位置为 $c(\phi_i')$,重叠覆盖区域质心为 $c(\phi_i'')$,被遮挡区域质心位置为 $c(\phi_i''')$,如图3所示.在图3中,节点 s_i 的有效区域质心 $c(\phi_i')$ 位于其有效监控区域内;节点 s_k 的有效区域受到障碍物遮挡,因此其有效区域质心 $c(\phi_k')$ 不在其有效监控

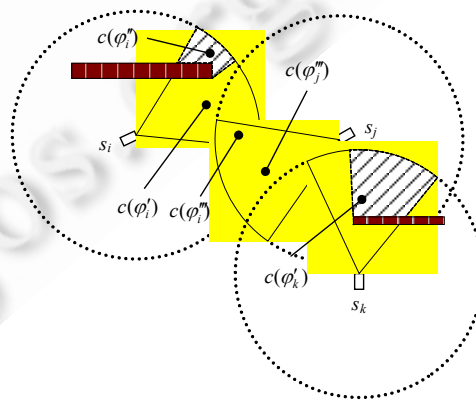


Fig.3 Position of every region's centroid
图3 各区域质心位置示意

区域内.当一个节点(如 s_j)与其他多个节点的监控区域发生重叠时,会出现多个不连通的子区域,此时,重叠覆盖区域质心为各个重叠覆盖子区域的共同质心.因此,重叠覆盖区域质心有可能不在任何一个重叠覆盖子区域内(如 $c(\varphi_i'')$).

2.2 虚拟受力分析

在存在障碍物的监控区域中,利用虚拟势场方法来优化视频传感器网络的覆盖率,近似等价于质心点与质心点之间的虚拟力作用问题.在本模型中,虚拟斥力 \bar{F}_i' 为两组斥力的垂直分量的矢量和:第 1 组斥力存在于有效监控区域质心 $c(\varphi_i')$ 与重叠覆盖区域质心 $c(\varphi_i'')$ 之间,记为 \bar{F}_i' ;第 2 组斥力存在于有效监控区域质心 $c(\varphi_i')$ 与被遮挡区域质心 $c(\varphi_i'')$ 之间,记为 \bar{F}_i'' .在各种斥力的综合作用下,传感器监视方向将围绕传感器中心点发生旋转,从而逐步找到较优的监视方向,降低冗余覆盖区域并减小遮挡区域,逐渐提高整个监测区域的总覆盖率,最终增强视频传感器网络的监控效率.下面给出两组虚拟斥力 \bar{F}_i' 和 \bar{F}_i'' 的计算方法.

产生斥力 \bar{F}_i' 的前提条件是,节点 s_i 与其他节点存在重叠覆盖区域,即 $\varphi_i'' \neq \emptyset$.此时,斥力 \bar{F}_i' 的作用为从质心 $c(\varphi_i'')$ 指向质心 $c(\varphi_i')$,如图 4(a)所示.斥力 \bar{F}_i' 可以分解为作用于节点中心的力 $\bar{F}_{i//}'$ 和与圆周相切的力 $\bar{F}_{i\perp}'$.由于本文所考虑的前提是传感节点位置不发生变化,因此力分量 $\bar{F}_{i//}'$ 不起作用;而力分量 $\bar{F}_{i\perp}'$ 导致监视方向沿圆周切线方向绕节点中心旋转,定义绕节点中心逆时针旋转为正方向.定义斥力 \bar{F}_i' 如下:

$$\bar{F}_i' = \left(K_1 \frac{\iint_{x,y} \varphi_i''}{\iint_{x,y} \varphi_i'} , a_i' \right) \tag{3}$$

其中, K_1 表示质心 φ_i' 与质心 φ_i'' 间的斥力系数,该值为常数,本文取 $K_1=1$; a_i' 为斥力 \bar{F}_i' 的方向,从 $c(\varphi_i'')$ 指向 $c(\varphi_i')$.

斥力 \bar{F}_i'' 的作用为从质心 $c(\varphi_i'')$ 指向质心 $c(\varphi_i')$,如图 4(b)所示.与斥力 \bar{F}_i' 类似,斥力 \bar{F}_i'' 的与圆周相切的力分量 $\bar{F}_{i\perp}''$ 对传感节点产生旋转力.与斥力 \bar{F}_i' 不同的是,由于障碍物位置固定,虽然受到斥力 \bar{F}_i'' 的反作用力,但是其空间位置和角度都不发生变动.定义斥力 \bar{F}_i'' 如下:

$$\bar{F}_i'' = \left(K_2 \frac{\iint_{x,y} \varphi_i''}{\iint_{x,y} \varphi_i'} , a_i'' \right) \tag{4}$$

其中, K_2 表示质心 φ_i' 与质心 φ_i'' 间的斥力系数,该值为常数,本文取 $K_2=1$; a_i'' 为斥力 \bar{F}_i'' 的方向,从 $c(\varphi_i'')$ 指向 $c(\varphi_i')$.通过调整斥力系数 K_1 和 K_2 的比例,可以在优化过程中平衡遮挡区域与重叠区域的平衡关系.至此,作用于节点 s_i 的虚拟斥力 \bar{F}_i 为斥力 \bar{F}_i' 和斥力 \bar{F}_i'' 的矢量和,即 $\bar{F}_i = \bar{F}_{i\perp}' + \bar{F}_{i\perp}''$.

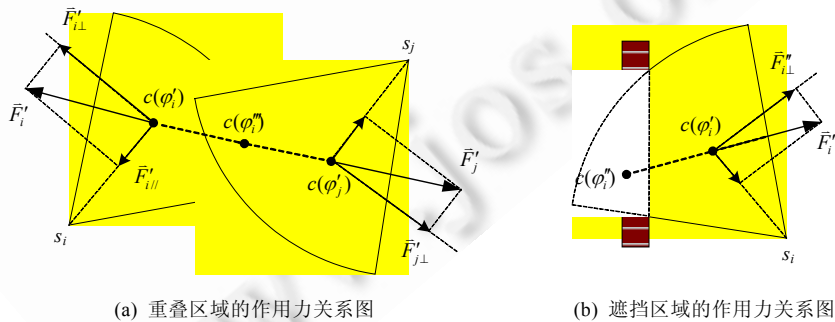


Fig.4 Virtual forces between two kinds of centroid

图 4 两类质心间的虚拟力作用

2.3 运动学约束与动力学约束

前文设计了 PFOFSA 算法中的各类区域质心的定义及其受力方式,在视频传感器网络无盲区覆盖模型中的作用力和区域质心点都是虚拟的,对于虚拟物理世界中的传感节点监视方向寻优问题,存在一定的控制规则来约束质心点受力与运动间的关系:区域质心点在受到作用力时,会使节点监视方向绕节点中心做顺时针/逆时针转动.因此,在虚拟力作用下的旋转运动将受到运动学和动力学的双重约束,具体表现为运动学约束和动力学约束两个方面.

(1) 运动学约束

在 PFOFSA 模型中,不同区域之间相互作用力的有效合力 \bar{F}_i 将导致视频传感节点的传感方向发生旋转,其旋转轨迹围绕节点中心做圆周运动.那么,在虚拟力 \bar{F}'_{i1} 和 \bar{F}''_{i1} 共同作用的影响下,可设传感节点每隔计算步长 Δt 就从区域 $d(s_i)$ 中的其他相邻节点获取一次视频监视方向的信息,并根据自身监视方向信息计算当前视域中的障碍物信息,从而计算所受的旋转合力 \bar{F}_i ,确定在单位时长内的旋转弧度.

(2) 动力学约束

动力学约束研究区域质心点所受合力与转动方向及弧度间的关系.在 PFOFSA 的运动模型中,动力学约束包含两个方面的内容:旋转合力 \bar{F}_i 与转动方向及弧度之间的关系;区域质心点运动的静止条件.

节点在受到旋转合力 \bar{F}_i 作用时,节点旋转的切线方向与 \bar{F}_i 的方向一致,PFOFSA 算法设逆时针旋转为正方向.力 \bar{F}_i 的大小与单位时长内的旋转弧度大小关系一般有两种设定:一种是力的大小与旋转角度无关,每次均旋转一个微小的角度,参见文献[9,12]的变化模型;另一种是旋转的弧度与力的大小成正比关系,参见文献[14,16]的变化模型.根据文献[14,16]中对节点受力与移动距离关系的分析,在某些情况下,采用正比关系可提高全局收敛速度.针对 PFOFSA 模型,本文对力与旋转弧度间的两种对应关系均做了研究,结果发现(参见第 3.2 节),采用每次固定旋转一个微小角度的方式,将很容易陷入一些次优区域从而限制了覆盖率提升;如果采用力与旋转弧度成正比的方式,则能够较大幅度地提高覆盖率;无论采用哪种方式,均不影响 PFOFSA 的收敛性.因此,本文构造了旋转合力与旋转弧度的关系公式,即 t 时刻力 $\bar{F}_i(t)$ 与 $t+1$ 时刻监视方向弧度变化 $\Delta\alpha_i(t+1)$ 之间的关系如下:

$$\Delta\alpha_i(t+1) = \Delta\alpha_{\max} \left(\frac{\min(\bar{F}_i(t), F_{\max})}{F_{\max}} \right)^2 \quad (5)$$

其中, F_{\max} 为常数,用于限制合力的最大值; $\Delta\alpha_{\max}$ 为常数,表示时间弧度的最大变化范围.应用此对应关系,在每个单位时长内,传感节点的旋转速度随着受力的大小发生变化:当受力较大时,能够快速收敛到较优情况;当受力较小时,能够通过微调来逐步趋向最优解.

为了便于分析监视方向弧度变化固定时的网络整体变化趋势,本文定义 $t+1$ 时刻监视方向弧度变化的固定形式为 $\Delta\alpha'_i(t+1)$, 且 $\Delta\alpha'_i(t+1) = A$. 其中, A 为常数(本文中设定为 $\pi/30$).

当节点所受的旋转合力 $\bar{F}_i(t)$ 为 0 时,其在 $t+1$ 时刻无须发生旋转,因为对其自身而言已经达到理想的覆盖状态.为了避免系统在收敛的最后阶段出现不必要的抖动,所以设定受力阈值 ε , 如果 $\|\bar{F}_i(t)\| < \varepsilon$, 则认为节点下一时刻将处于静止状态.

当系统达到稳定状态时,所有节点均无须发生旋转.若经过数个单位时长 Δt 后,每个节点受力均趋于 0, 则此时整个网络达到稳定状态,所对应的部署方案 $\{s_1(\alpha_1)^*, s_2(\alpha_2)^*, \dots, s_n(\alpha_n)^*\}$ 通常为 PFOFSA 算法的较优解.

2.4 算法描述

基于前面的分析,本文提出了一种基于虚拟势场的视频传感器网络无盲区覆盖算法(PFOFSA).该算法是一个分布式算法,在每个视频传感节点上并发执行.PFOFSA 算法描述如下:

- Step 0. $t \leftarrow 0$; //初始化单位时长计数器
- Step 1. 获取节点 s_i 中心的平面坐标 $P(x_i, y_i)$;
- Step 2. 根据 $P(x_i, y_i)$ 计算探测区域 $d(s_i)$, 取得邻居节点集合 S' ;
- Step 3. while (true)

Step 3.1. 根据 $P(x_i, y_i)$ 和 α_i 计算障碍物集合 $B' \leftarrow B \cap \varphi_i$;

Step 3.2. 根据 B' 计算遮挡区域 φ_i'' ;

Step 3.3. $\varphi_i''' \leftarrow \emptyset$; //将重叠区域设为空

Step 3.4. for ($j=0$; $j < \text{count}(S')$; $j++$)

 Step 3.4.1. 计算 s_j 与节点 S_j' 的重叠区域 φ_{ij}'' ;

 Step 3.4.2. $\varphi_i''' \leftarrow \varphi_i''' \cup \varphi_{ij}''$;

Step 3.5. end

Step 3.6. $\varphi_i' \leftarrow (\varphi_i - \varphi_i'' - \varphi_i''')$;

Step 3.7. 计算区域质心 $c(\varphi_i')$, $c(\varphi_i'')$, $c(\varphi_i''')$;

Step 3.8. if ($c(\varphi_i'') \neq \emptyset$)

 Step 3.8.1. 计算质心 $c(\varphi_i'')$ 对质心 $c(\varphi_i')$ 的斥力 $\bar{F}_i''(t)$;

Step 3.9. end

Step 3.10. if ($c(\varphi_i''') \neq \emptyset$)

 Step 3.10.1. 计算质心 $c(\varphi_i''')$ 对质心 $c(\varphi_i')$ 的斥力 $\bar{F}_i'''(t)$;

Step 3.11. end

Step 3.12. $\bar{F}_i(t) \leftarrow \bar{F}_{i\perp}'(t) + \bar{F}_{i\perp}''(t)$; //确定节点所受的旋转合力

Step 3.13. if ($\|\bar{F}_i(t)\| > \varepsilon$)

 Step 3.13.1. 由 $\bar{F}_i(t)$ 符号确定旋转方向;

 Step 3.13.2. 计算视角弧度变化 $\Delta\alpha_i(t+1)$;

 Step 3.13.3. $\alpha_i \leftarrow \alpha_i + \Delta\alpha_i(t+1)$; //调整传感器监视方向

Step 3.14. end

Step 3.15. $t \leftarrow t+1$;

Step 3.16. *Sleep*(Δt);

Step 4. end

3 算法仿真与性能分析

本节通过一系列仿真实验来分析 PFOFSA 算法的有效性,并验证其对覆盖率的提升效果.本文利用 C#语言在 .NET FRAMEWORK 平台上开发了适用于视频传感器网络部署与覆盖研究的仿真软件,并利用该软件进行了大量仿真实验.

3.1 仿真环境与实验实例

仿真实验所考察的环境为一个 $400 \times 300 \text{m}^2$ 的监控区域,将该区域以最小单位 m 进行离散化.为简化实验,假设监控区域中所有传感节点均同构,即同次实验中所有节点的有效监控距离和视角规格分别相同,其范围分别是 $L \in [0\text{m}, 100\text{m}]$, $A = [\pi/6, \pi]$.通过一个具体实例来说明 PFOFSA 算法在视频传感器网络覆盖问题中的优化效果.在指定监控区域中安装 8 个形状各异的障碍物,初始随机投放 60 个节点,且传感节点参数指定为 $L=40\text{m}$, $A=\pi/3$.

针对上述实例,记录了 PFOFSA 算法运行过程中前 60 个单位时长中视频传感器网络对监控区域的覆盖率优化情况,如图 5 所示.通过此次实验结果可以发现网络中各个节点的区域质心在受到各种虚拟力的综合影响下,监视方向所发生的变化,障碍物遮挡盲区和覆盖重叠区域逐步减小.从 t 与 r 的变化关系可以看出,在 $t_1 \rightarrow t_{10}$ 之间,整体的覆盖率 r 上升趋势明显;随后,提升效果逐渐放缓,逐步趋于稳定.此例中,传感节点经过 60 步的调整后,其网络覆盖率由最初的 29.35% 提高到 42.64%,提升覆盖率达 13.29%.

为了能够直接观察 PFOFSA 算法在障碍物数量较多情况下的优化效果,在上述实例的基础上将障碍物数量提高 1 倍(再增加 8 个障碍物),其余实验条件均保持不变.实验记录了 PFOFSA 算法运行过程中前 60 个单位

时长中监控区域的覆盖率变化情况,如图 6 所示.通过此次实验可以发现,PFOFSA 算法在障碍物数量增加 1 倍的情况下仍然能够有效地提高整体覆盖率.从 t 与 r 的变化关系可以看出,在 $t_1 \rightarrow t_{20}$ 之间,整体覆盖率 r 上升趋势明显;随后,提升效果逐渐放缓,逐步趋于稳定.传感节点经过 60 步的调整后,其网络覆盖率达到最初的 28.37% 提高到 40.05%,提升覆盖率达 11.68%.

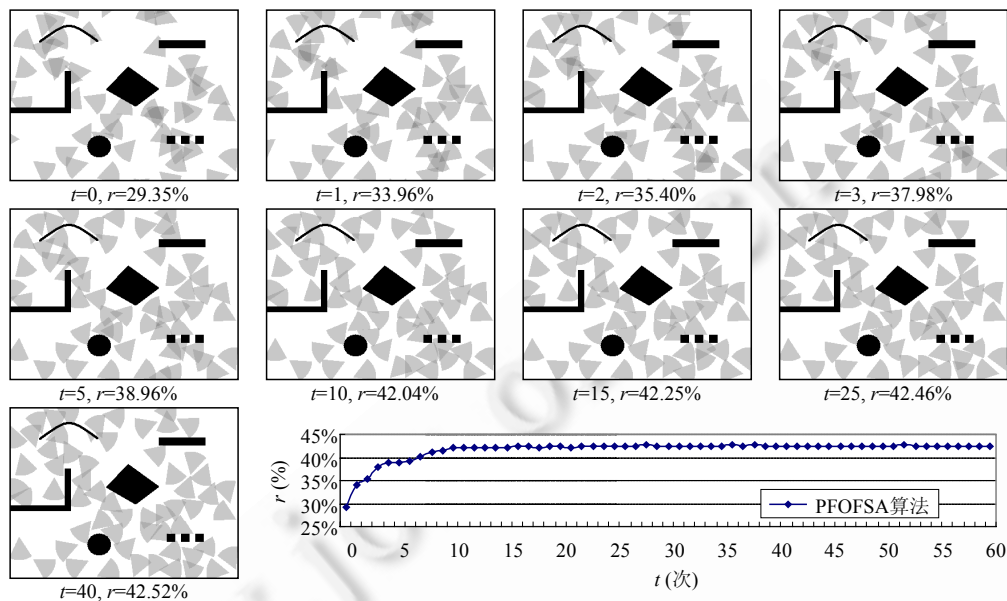


Fig.5 A case of coverage optimization with eight obstacles

图 5 8 个障碍物情况下的优化实例

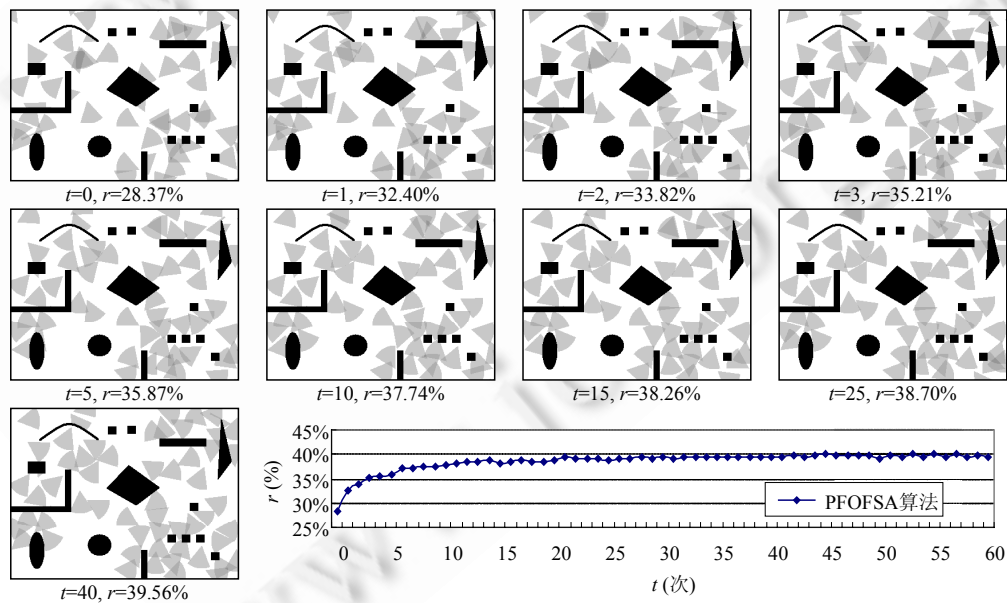


Fig.6 A case of coverage optimization with sixteen obstacles

图 6 16 个障碍物情况下的优化实例

通过两次实验的比较可知,在 PFOFSA 算法的作用下,所有传感节点都在预计的范围内发生转动,并且计算时长 t 与整体覆盖率 r 满足指数关系.当覆盖率逐步趋于稳定后,即可认为所得到的传感器网络覆盖率近似达到最优解.值得注意的是,在障碍物数量增加的情况下,整体覆盖率提升过程中会有明显的抖动.该现象与前面所分析的次优解情况一致,不过,其覆盖率提升过程还是满足指数关系的.

3.2 收敛性分析

为了考察 PFOFSA 算法的收敛性,本节针对模型中的几个关键参数的不同取值进行分组实验.分析的关键参数包括监控区域中障碍物数量和传感器网络节点规模大小.每次实验首先随机生成障碍物,障碍物以矩形来模拟,长度取值范围为 [50m,100m],宽度取值范围为 [5m,30m],平面位置在监控区域中随机分布.然后,随机部署指定数量的传感节点,且节点的平面位置不得位于障碍物中.节点中设定的实验参数为 $L=40\text{m}$, $A=\pi/3$.实验中的每组参数建立 1 000 个系综,统计算法收敛时计算时长的平均值 \bar{t} .为了更好地验证算法的有效性,统计 1 000 个系综收敛后的整体覆盖率 $r(t)$ 相对于初始覆盖率 $r(0)$ 所提升的比例 $R=r(t)/r(0)$ 的平均值 \bar{R} .此时, \bar{R} 能够较好地反映出算法对覆盖率的优化效果.

前面讨论了节点监视方向弧度变化的两种方式: $\Delta\alpha_i(t+1)$ 与 $\Delta\alpha'_i(t+1)$.本节也对这两种变化方式分别进行实验,观察弧度变化方式不同对 PFOFSA 算法收敛性的影响.因此,指定 \bar{t} 的仿真过程采用 $\Delta\alpha_i(t+1)$,而 \bar{r} 的仿真过程采用 $\Delta\alpha'_i(t+1)$.分组实验中,障碍物数量 $\text{count}(\text{Obstacle})$ 分别取 5,10,15 和 20,观察障碍物数量与 PFOFSA 算法收敛时长的关系.监控区域节点数量分别取 50,70,90 和 110,观察传感节点数量的多少对 PFOFSA 算法收敛速度的影响.仿真结果的统计数据如图 7 所示.

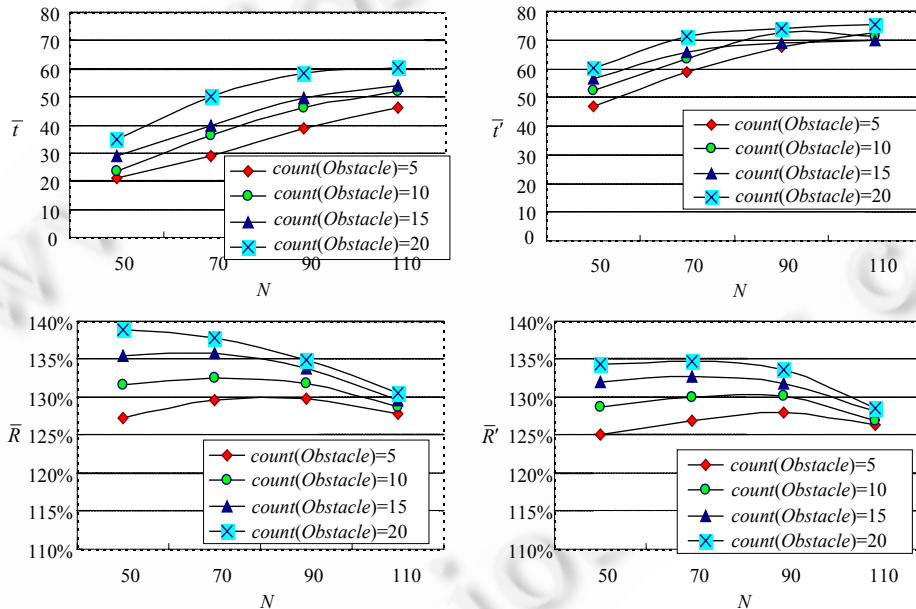


Fig.7 Relationship between the key parameters and the convergence

图 7 关键参数对收敛性的影响

通过分析实验数据可知,PFOFSA 算法的收敛时长(即网络整体调整的单位时间数)随节点数目的增加而增加,但其改变速度逐渐减慢且趋于恒定.另外,在计算过程中,无论采用哪种弧度变化方式, \bar{t} 和 \bar{r} 均满足相同的收敛趋势, \bar{R} 和 \bar{R}' 调优效果均高于 100%.不过, $\Delta\alpha_i(t+1)$ 弧度变化方式无论收敛速度还是调优效果都要明显优于 $\Delta\alpha'_i(t+1)$ 弧度变化方式.由此可见,PFOFSA 算法在各种参数情况下均具有较好的收敛性,可以在较短的单位时长内完成整个网络的调优过程,而且在收敛时都能达到较好的调优效果.

3.3 仿真计算与分析

本节通过一系列仿真实验来考察相关参数对 PFOFSA 算法性能的影响.这些参数包括:障碍物数量 $count(Obstacle)$ 、节点数量 N 、有效监控距离 L 和节点视角大小 A .在这些参数取值不同的情况下,针对每种情况,与现有覆盖增强算法 PFCEA 算法和 SOA 算法进行效果比较.监控区域障碍物的随机部署方案与上一节相同,且对每种参数情况都建立 1 000 个系综.

1. 与同类型方法的比较

障碍物数量分别取不同数量时,比较 3 种算法的覆盖率优化效果,如图 8 所示.从这组实验结果可以看出,随着障碍物数量的增加,PFOFSA 算法优化后的覆盖率提升比例 \bar{R} 几乎与节点数量成正比,说明 PFOFSA 算法能够适应不同障碍物数量的情况,而且调优效果很好.从图 8 的实验数据来看,PFCEA 算法在障碍物数量增加的情况下 \bar{R} 提升效果不明显,而 SOA 算法在障碍物数量增加的情况下对 \bar{R} 的提升效果逐渐放缓.因此,在相同参数的情况下,PFOFSA 算法对传感器网络的整体覆盖率调优效果明显占优.

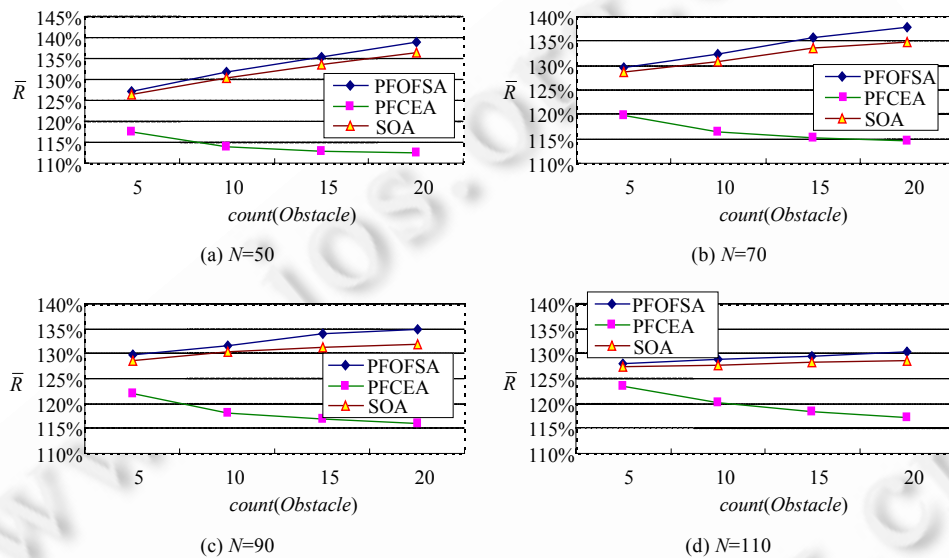


Fig.8 Comparison of PFOFSA, PFCEA and SOA

图 8 PFOFSA,PFCEA 和 SOA 优化效果比较

2. 相关参数对 PFOFSA 算法有效性的影响

在优化监控区域覆盖率的过程中,与调优效果直接相关的两个参数分别是:障碍物数量 $count(Obstacle)$ 和监控节点数量 N .为了验证 PFOFSA 算法能够有效地提高监控区域覆盖率,本次实验调整障碍物数量区间和监控节点数量规模来进行实验.在实验中,障碍物数量 $count(Obstacle)$ 取值范围为[5,40],监控节点数量 N 取值范围为[50,310],针对每种参数组合均建立 1 000 个系综.在实验过程中记录每次仿真结果,统计随机分布的覆盖率平均值 $\bar{r}(0)$ 、优化后的覆盖率平均值 $\bar{r}(t)$ 和覆盖率提升比例的平均值 \bar{R} ,结果如图 9 所示.

当障碍物数量和监控节点数量发生变化时,随机部署情况下的初始覆盖率 $\bar{r}(0)$ 变化如图 9(a)所示.这组实验将作为对照实验来验证 PFOFSA 算法的有效性.观察优化后的覆盖率平均值 $\bar{r}(t)$ 变化趋势(如图 9(b)所示)可以看出,无论障碍物数量与节点数量如何调整,通过 PFOFSA 算法均能提高监控区域覆盖率.进一步分析覆盖率提升比例的平均值 \bar{R} 的变化规律(如图 9(c)所示)可以看出:(1) 当节点规模较小时 \bar{R} 较大,优化效果较好;(2) 随着节点数目的增多 \bar{R} 逐渐减小,最终趋于 100%,说明在节点数目未饱和前 PFOFSA 算法均能起到优化覆盖率的效果;(3) 障碍物规模越大,优化比例 \bar{R} 越大,说明 PFOFSA 算法能够较好地适应监控区域存在障碍物的情况;(4) 随着节点规模的增大,障碍物规模大小对 \bar{R} 的影响逐渐变小,说明 PFOFSA 算法能够较好地适应不同的障

障碍物规模.

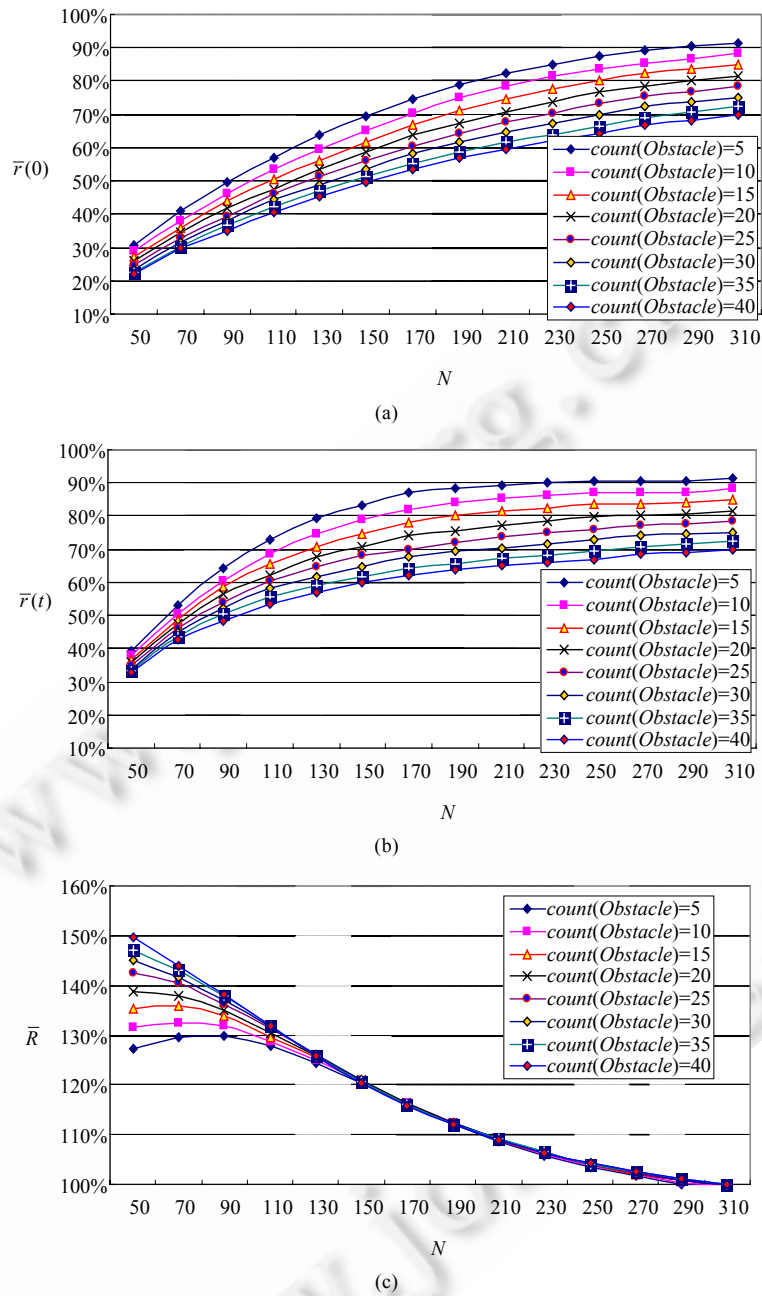


Fig.9 Effect of key parameters on PFOFSA algorithm performance

图 9 主要参数对 PFOFSA 算法性能的影响

4 结束语

本文从无线视频传感节点的有向感知特性出发,首先分析了监控区域存在障碍物的覆盖特征,讨论了视频传感器网络覆盖效果与监控区域之间的相互关系.在此基础上定义了视频传感器网络的无盲区覆盖模型,基于

虚拟势场的工作原理提出了一种适用于无盲区覆盖模型的覆盖率动态优化算法 PFOFSA.然后设计了 PFOFSA 算法中的监控节点抽象关系及虚拟力的相互作用方法,并给出了监控节点的运动规则.在无线视频传感器网络覆盖率动态优化过程中,PFOFSA 算法通过监控区域、重叠区域和遮挡区域之间的相互作用逐步消除网络中的感知重叠区和盲区.最后,通过一系列的仿真实验分析了不同监控参数对算法收敛性的影响,考察了动态收敛效果并验证了算法的有效性.

致谢 在此,我们向对本文提出宝贵建议的审稿专家及参与本文内容讨论的所有老师和同学表示衷心的感谢.

References:

- [1] Rahimi M, Ahmadian S, Zats D, Laufer R, Estrin D. Magic of numbers in networks of wireless image sensors. In: Proc. of the SenSys Workshop on Distributed Cameras. 2006.
- [2] 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> [doi: 10.1360/jos170422]
- [3] Dimokas N, Katsaros D, Manolopoulos Y. Cooperative caching in wireless multimedia sensor networks. Mobile Networks and Applications, 2008,13(3-4):337-356. [doi: 10.1007/s11036-008-0063-3]
- [4] 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. [doi: 10.1109/TRA.2004.824698]
- [5] Megerian S, Koushanfar F, Potkonjak M, Srivastava MB. Worst and best-case coverage in sensor networks. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2005,4(1):84-92. [doi: 10.1109/TMC.2005.15(410)%204]
- [6] Cărbunar B, Grama A, Vitek J, Cărbunar O. Redundancy and coverage detection in sensor networks. ACM Trans. on Sensor Networks, 2006,2(1):94-128. [doi: 10.1145/1138127.1138131]
- [7] Akan OB. Performance of transport protocols for multimedia communications in wireless sensor networks. IEEE Communications Letters, 2007,11(10):826-828. [doi: 10.1109/LCOMM.2007.061811]
- [8] Gu YY, Tian Y, Ekici E. Real-Time multimedia processing in video sensor networks. Signal Processing: Image Communication Journal, 2007,22(3):237-251. [doi: 10.1016/j.image.2006.12.013]
- [9] 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 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1152.htm> [doi: 10.1360/jos181152]
- [10] Cheng WF, Liao XK, Shen CX. Maximal coverage scheduling in wireless directional sensor networks. Journal of Software, 2009, 20(4):975-984 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3240.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03240]
- [11] Tezcan N, Wang WY. Self-Orienting wireless multimedia sensor networks for occlusion-free viewpoints. Computer Networks, 2008,52(13):2558-2567. [doi: 10.1016/j.comnet.2008.05.014]
- [12] Xiao F, Wang RC, Ye XG, Sun LJ. A path coverage-enhancing algorithm for directional sensor network based on improved potential field. Journal of Computer Research and Development, 2009,46(12):2126-2133 (in Chinese with English abstract).
- [13] Howard A, Matarić MJ, Sukhatme GS. Mobile sensor network deployment using potential fields: A distributed, scalable solution to the area coverage problem. In: Proc. of the 6th Int'l Symp. on Distributed Autonomous Robotics Systems. 2002. 25-27.
- [14] Poduri S, Sukhatme GS. Constrained coverage for mobile sensor networks. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation. 2004. 165-172. [doi: 10.1109/ROBOT.2004.1307146]
- [15] Zou Y. Coverage-Driven sensor deployment and energy-efficient information processing in wireless sensor networks [Ph.D. Thesis]. Duke University, 2004.
- [16] Wang X, Wang S, Ma JJ. Dynamic sensor deployment strategy based on virtual force-directed particle swarm optimization in wireless sensor networks. Acta Electronica Sinica, 2007,35(11):2038-2042 (in Chinese with English abstract).
- [17] Williams A, Xie D, Ou S, Grupen R, Hanson A, Riseman E. Distributed smart cameras for aging in place. In: Proc. of the SenSys Workshop on Distributed Cameras. 2006.

附中文参考文献:

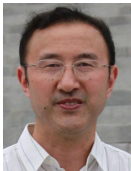
- [2] 任彦,张思东,张宏科.无线传感器网络中覆盖控制理论与算法.软件学报,2006,17(3):422-433. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/422.htm> [doi: 10.1360/jos170422]
- [9] 陶丹,马华东,刘亮.基于虚拟势场的有向传感器网络覆盖增强算法.软件学报,2007,18(5):1151-1163. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1152.htm> [doi: 10.1360/jos181152]
- [10] 程卫芳,廖湘科,沈昌祥.有向传感器网络最大覆盖调度算法.软件学报,2009,20(4):975-984. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3240.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03240]
- [12] 肖甫,王汝传,叶晓国,孙力娟.基于改进势场的有向传感器网络路径覆盖增强算法.计算机研究与发展,2009,46(12):2126-2133.
- [16] 王雪,王晟,马俊杰.无线传感网络布局的虚拟力导向微粒群优化策略.电子学报,2007,35(11):2038-2042.



蒋一波(1982-),男,浙江杭州人,博士,副教授,主要研究领域为流媒体监控与流媒体内容分析.



郑建伟(1982-),男,博士,讲师,主要研究领域为模式识别.



王万良(1957-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为计算机控制与智能自动化,计算机网络控制与管理.



姚信威(1986-),男,博士生,CCF 学生会员,主要研究领域为流媒体网络.



陈伟杰(1985-),男,博士生,主要研究领域为流媒体网络.