

无线多媒体传感器网络感知模型与数量估计*

赵 静⁺, 曾建潮

(太原科技大学 复杂系统与计算智能实验室, 山西 太原 030024)

Sense Model and Number Estimation of Wireless Multimedia Sensor Networks

ZHAO Jing⁺, ZENG Jian-Chao

(Complex System and Computational Intelligence Laboratory, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

+ Corresponding author: E-mail: zhaojing_740609@163.com

Zhao J, Zeng JC. Sense model and number estimation of wireless multimedia sensor networks. Journal of Software, 2012, 23(8): 2104–2114 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4159.htm>

Abstract: Aiming at different application needs, this paper presents a classification taxonomy, in which these applications are fallen into 4 categories: Delayed coverage of sensor being higher than or in target region, non-delayed coverage of sensor being higher than or in target region. Taking factors of sense regions and possible ones into account, it proposes different sensing models depending on different applications. Based on the above mentioned, the models and nodes deployment methods are analyzed. The results indicate that the proposed sensing models and estimation methods agree with actual application than previous approaches.

Key words: wireless multimedia sensor network; multimedia sensor; delayed coverage; non-delayed coverage; sense area; possible sense area

摘 要: 针对无线传感器网络的不同应用需求, 将其分为 4 种类型: 节点平行于目标平面的延时覆盖、无延时覆盖、节点位于目标平面中的延时覆盖及无延时覆盖。综合考虑节点感知区域和可能感知区域等因素, 为每种应用构建了不同的感知模型。围绕不同的感知模型, 针对节点部署方式和部署个数进行了分析, 并且对结果进行了仿真。结果表明, 所提出的感知模型和部署个数的估计结果正确, 且更符合实际应用需求。

关键词: 无线多媒体传感器网络; 多媒体传感器; 延时覆盖; 无延时覆盖; 感知区域; 可能感知区域

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

无线通信、微电子等技术的发展催生了无线传感器网络技术(wireless sensor networks, 简称 WSNs)。无线传感器网络由大量低成本的微型传感器节点组成^[1], 完成特定的监测任务。无线传感器网络(WSN)包括全向感知网络、有向感知网络(视频感知网络)两类。全向感知网络实现比较简单的环境数据(如温度、湿度、光强等)的采集、传输与处理^[2]。但是, 随着监测任务的复杂化, 更加需要全面的、丰富的环境数据(如图像、视频等)来完成环境更精确的监测任务, 从而产生了有向感知网络。如多媒体(视频)感知网络中, 网络能力(如采集、存储、传输等等)增强了, 处理的数据(如图像、视频等)更加复杂了, 从而增加了数据处理的能力, 如对复杂图像、视频数据进行压缩、识别、融合处理等。总之, 有向传感器网络面临着更多新的挑战, 迫切需要全新的解决方法, 以指导有

* 基金项目: 国家自然科学基金(60975074); 高校博士科研启动基金(20112008); 山西高校科技研究开发项目(20111017)

收稿时间: 2009-04-08; 定稿时间: 2011-11-08

向感知网络系统地有效实现^[3].

在视频传感器网络覆盖的研究中,建立更符合实际应用的感知模型是整个研究的基础.在关于二维无线视频传感器网络覆盖研究中包含两种感知模型:扇形和三角形.如,Ma 等人^[4]建立了不可转动的扇形感知模型,该模型由一个四元组 (P,R,V,α) 表示,其中, P 表示视频节点的位置坐标, R 表示传感半径, V 为该视频传感器节点的传感方向且一经部署不再改变, α 代表视频节点视角偏移量;Tao 等人^[5]、Cai 等人^[6]、Ai 等人^[7]提出了一种方向可调的扇形感知模型,其中的不同点是方向可转动,表示为 $\overline{V}(t)$,即节点在 t 时刻的传感方向,但是在覆盖计算时仅考虑了感知扇形;Tezcan 等人^[8,9]、Adriaens 等人^[10]建立了方向可调的等边三角感知模型.这两种感知模型仅考虑了传感器的瞬时感知范围,却没有考虑视频传感器的可转动性,即没有考虑通过云台的转动,传感器可以监测到的整个区域——可能感知区域;Soro 等人^[11]把感知区域定义为:放置在屋顶的照相机所能摄到的地面的区域;在节点规模预测研究中,Ma 等人^[4]建立了网络覆盖率(p)与被监测区域面积(S)、节点传感半径(R)、节点视角偏移量(即一半的视角)(α)以及节点数目(N)之间的关系:

$$N \geq \frac{\ln(1-p)}{\ln(S-\alpha R^2)-\ln S} \quad (1)$$

从而可以获得满足一定网络覆盖率所需部署的传感器节点数目.但是该公式仅考虑了感知扇形,没有考虑节点的可能感知区域,同时仅考虑一重覆盖的节点预测.Liu 等人^[12,13]证明了在均匀随机部署中,目标区域中某个子区域被 N 个节点监测到的概率符合泊松点过程.

本文根据无线视频传感器网络不同的应用需求,综合考虑节点感知区域和可能感知区域,建立了不同的感知模型,并对不同的感知模型的部署方式与部署个数进行了分析.

1 无线多媒体传感器网络覆盖应用分类

1.1 定义

1.1.1 感知区域和可能感知区域

在目标平面,多媒体传感器在某时刻所感知到的区域被定义为感知区域,可能感知区域即通过云台的竖直、水平转动,在目标平面节点可以监测到的整个区域.如图 1 所示,阴影部分则为感知区域,整个圆形则为可能感知区域.

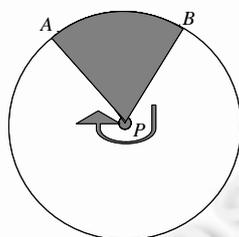


Fig.1 Sense area and possible sense area

图 1 感知区域与可能感知区域

1.1.2 垂直角度和绝对垂直角度

当传感器安置点高于目标平面时,令过安置点且平行于目标区域的平面为安置平面,令安置点为坐标原点,令通过节点且垂直于安置平面的平面为 XZ 坐标平面,在 XZ 坐标平面中令过安置点且平行于目标平面的一条直线作为 x 轴,令过坐标原点且竖直向下的直线为 z 轴,方向向下.垂直角度则为在 XZ 坐标平面中相对于 x 轴正方向,绝对垂直角度即为在 XZ 坐标平面中摄像机相对于 z 轴的正方向的角度 φ_2 ,如图 2 所示,垂直角度即为摄像机在 XZ 坐标平面中相对于 x 轴正方向的角度 φ_1 .

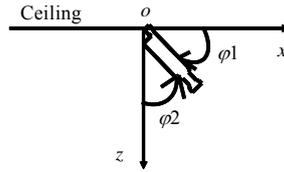


Fig.2 Vertical angle and absolute vertical angle

图2 竖直角与绝对竖直角

1.1.3 水平角度

在安置平面内,令安置点为坐标原点,并过原点建立垂直的 x 轴、 y 轴,构成 XY 坐标平面,如图 3 所示,水平角度即为在 XY 坐标平面中摄像机相对于 x 轴的正方向的角度 ϕ_3 .

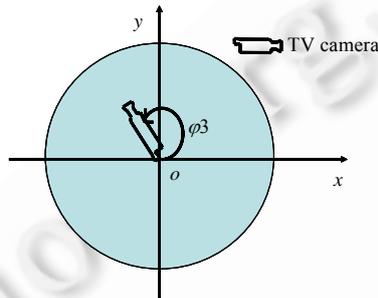


Fig.3 Horizontal angle

图3 水平角度

1.1.4 轴切面与轴切面三角

用过感知圆锥中心轴且垂直于锥底的平面将感知圆锥分成两部分,这个平面称为轴切面,轴切面与圆锥表面相交所得的三角形切面称为轴切面三角.如图 4 所示,过感知圆锥中心线,且垂直于圆 O 的平面 $MNQP$ 为轴切面,而平面 $MNQP$ 与感知圆锥相交所得的三角形 ABC 称为轴切面三角.

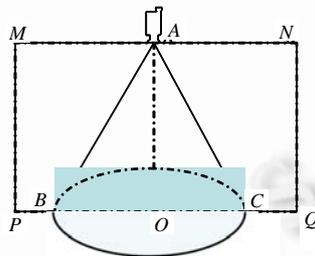


Fig.4 Sense taper, axial section, and triangle of axial section

图4 感知圆锥、轴切面与轴切面三角

1.1.5 延时覆盖和无延时覆盖

延时覆盖指监测任务对监测数据允许一定的延时,那么可以令云台以某速度转动以实现延时完全覆盖(感知区域小于可能感知区域).无延时覆盖指监测任务要求对整个目标区域进行实时监测,不允许数据延时,那么,节点一旦被安置好,云台的竖直角、水平角不可再变化(感知区域与可能感知区域一致).

1.1.6 感知圆锥

多媒体传感器感知到的最大三维空间称为感知圆锥.如图 4 所示,以 A 为顶、 O 为底的圆锥即为感知圆锥.

1.2 覆盖应用的不同分类

不同的应用环境应该建立不同的感知模型,并且设计不同的部署方案.根据节点与被观察的平面之间的相对位置,可以将网络应用分为节点的放置高于目标平面与平行于目标平面两种情形;根据监测数据延时要求,又可以分为延时覆盖与无延时覆盖两类.同时,根据节点与被观察的平面之间的相对位置和监测数据延时要求,可以将无线视屏传感器网络覆盖应用分为4类,分别如下所述:

1.2.1 节点放置点高于目标平面且无延时覆盖(A类)

节点被放置在高于目标平面的地方,节点一经放置,节点不再做任何转动,即无延时,那么节点在目标平面的感知区域为一个椭圆,并且感知区域与可能感知区域相同.如图5、图6所示.

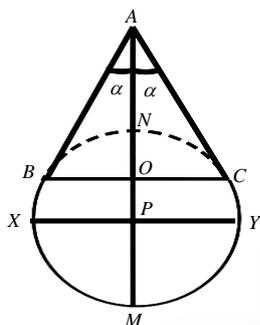


Fig.5 Vertical view of A class
图5 A类俯视图

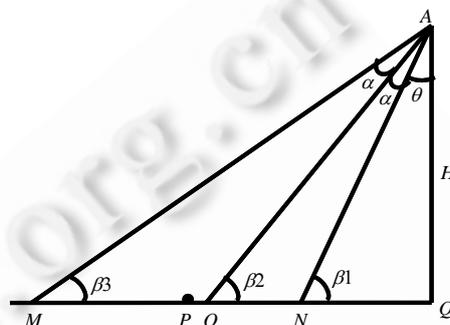


Fig.6 Lateral view of A class
图6 A类侧视图

1.2.2 节点放置点高于目标平面且延时覆盖(B类)

在这类覆盖应用中,节点被放置在高于目标平面的地方,且要求对目标平面进行延时监测,那么节点在目标平面的感知区域为一个椭圆,且可以通过节点的转动来获得更大的可能感知区域.

1.2.3 节点放置点在目标平面上且无延时覆盖(C类)

在这类覆盖应用中,节点放置在目标平面上,且进行无延时感知,它的感知区域是一个扇形且感知区域与可能感知区域一致.要求对目标区域进行不间断感知的监测任务,如静态目标监测等,属于这类覆盖.

1.2.4 节点放置点在目标平面上且延时覆盖(D类)

在这类覆盖应用中,节点放置在目标平面上,且进行延时感知,它的感知区域是一个扇形且通过云台的转动可能感知区域为一个圆,感知区域小于可能感知区域.面积覆盖则属于此类覆盖.

这4种分类涵盖了无线多媒体传感器网络二维模型的全部应用.

2 感知模型的建立

2.1 A类应用的感知模型

感知区域与可能感知区域相同都为一个椭圆,如图7所示.建立五元组椭圆感知模型如下: $(P, H, \varphi_1, \varphi_3, \alpha)$,其中: P 表示感知圆锥投影到地面形成椭圆形的中心点坐标; H 为安置点距离目标平面的高度; φ_1 表示节点安置的垂直角度; φ_3 表示节点安置的水平角度; α 代表视频节点视角偏移量,即一半的视角.如图5、图6所示,已知 $\theta = |90 - \varphi_1| - \alpha$,所以可以得到椭圆长半径 a 与椭圆短半径 b :

$$L1 = \text{tg}(2\alpha + \theta) - \text{tg}\theta \tag{2}$$

$$L2 = \text{tg}(2\alpha + \theta) - 2\text{tg}(\alpha + \theta) + \text{tg}\theta \tag{3}$$

$$a = MP = NP = \frac{H \times L1}{2} \tag{4}$$

$$b = \frac{H \times L1 \times L2}{2 \times \sqrt{L1^2 - \frac{4 \sin^2(\alpha)}{\cos^2(\alpha + \theta)}}} \quad (5)$$

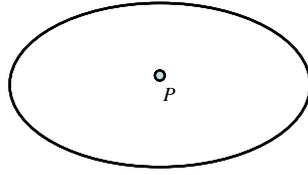


Fig.7 Sense model of A class
图 7 A 类感知模型

2.2 B类应用的感知模型

该应用具有椭圆的感知区域、圆形可能感知区域,如图 8 所示.建立八元组圆形感知模型如下:($O,P,R,H,\phi_1,\phi_3,\alpha,\tau$),其中, O 表示安置点在目标平面的投影坐标, R 表示整个可能感知区域的半径, τ 表示延时.即通过云台的转动能感知到整个可能感知区域所用的时间.

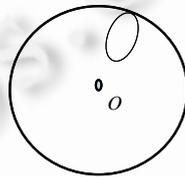


Fig.8 Sense model of B class
图 8 B 类感知模型

2.3 C类应用的感知模型

该应用中可能感知区域与感知区域相同,都为扇形,如图 9 所示.建立四元组扇形感知模型如下:(P,R,\vec{v},α),其中, P 表示视频节点的位置坐标, R 表示传感半径, \vec{v} 为该视频传感器节点的传感方向.

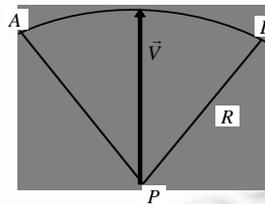


Fig.9 Sense model of C class
图 9 C 类感知模型

2.4 D类应用的感知模型

该应用感知区域为扇形,可能感知区域为圆形,如图 10 所示.建立五元组圆形感知模型如下:(P,R,ϕ_3,α,τ),其中, ϕ_3 为节点安放的水平角度,它可以取($0^\circ \sim 360^\circ$)的任何值.

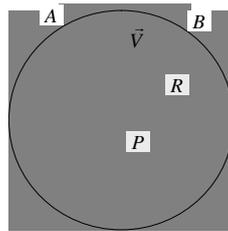


Fig.10 Sense model of D class
图 10 D 类感知模型

3 节点部署方式与个数分析

节点部署分为确定性部署、随机部署两类.在确定性部署中,关心的是对于不同的感知模型,怎样部署节点才能实现用最少的节点达到目标区域的完全覆盖(即怎样部署节点间的覆盖重叠最小);而在随机部署中,节点的初始部署方式都是随机抛撒,所以为了实现特定的覆盖率,节点个数的预测则显得尤为重要.本节就分别对确定性部署中的部署方式与随机部署中的节点预测进行分析.

3.1 确定性部署的部署方式分析

在确定性部署中,目标环境友好可达.不同的感知模型,实现完全覆盖的部署方式是不同的,分别分析如下:

3.1.1 圆形感知模型的部署方式分析

圆形感知模型虽然与传统的全向感知模型有所不同(它不是同时时刻感知整个圆形区域,而是通过云台的转动,经过一段时间才能感知到整个圆形区域),但是在部署方式上和全向感知模型相同.Zhang 等人^[14]已经证明了圆形感知模型的最优部署方式:为了目标区域中用最少的节点个数来得到最大的面积覆盖,则可以转换为节点之间的重叠最小的问题.并且得出:当 3 个同性质的感知圆盘的中心点形成边长为 $\sqrt{3}r$ 的等边三角形时,覆盖重叠最小.下面分别给出 B 类和 D 类圆形感知模型所对应的部署图,如图 11、图 12 所示.

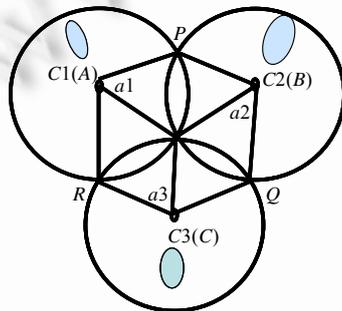


Fig.11 Deployment of circular sense model of B class
图 11 B 类圆形感知模型的部署

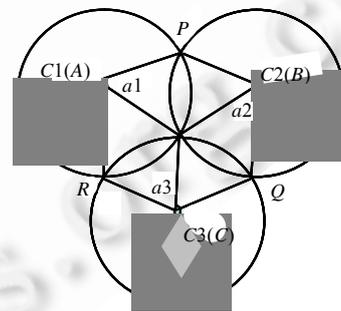


Fig.12 Deployment of circular sense model of D class
图 12 D 类圆形感知模型的部署

3.1.2 扇形感知模型的部署方式分析

扇形感知模型的部署方式分为两种:一种是圆形方式,如图 13 所示;一种是平铺方式,如图 14 所示.

1. 圆形方式

将感知扇形先组合成一个圆形,多余的部分重叠;然后,将组合成的圆形采用上面提到的圆形感知模型的部署方式再进行部署,实现完全覆盖.在这种部署方式下,如果夹角正好被 2π 整除,那么在组合成圆形时没有覆盖重叠;否则,在组合圆形时会因为多余角度而形成一个覆盖重叠,如图中的扇形 OAB 与 OMN 的重叠部分 OAN .然后,组合后的圆形按照圆形感知模型中的部署方式进行部署时又会产生一个覆盖重叠.将这些覆盖重叠都平

均到每一个节点,这样,就将整个目标区域的部署问题简化为求出一种部署方式使得节点平均覆盖面积最小的问题.

2. 平铺方式

在平铺部署方式中,也可将覆盖重叠区域平均到每一个节点,将其转化为求出一种部署方式使得节点平均覆盖面积最小的问题.

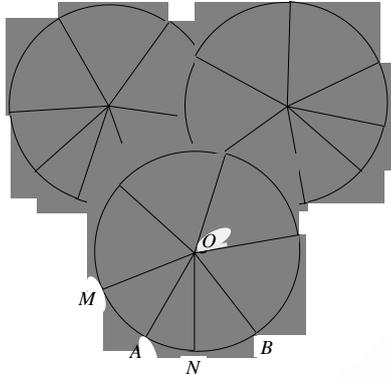


Fig.13 Circular deployment of sector sense model

图 13 扇形感知模型的圆形部署方式

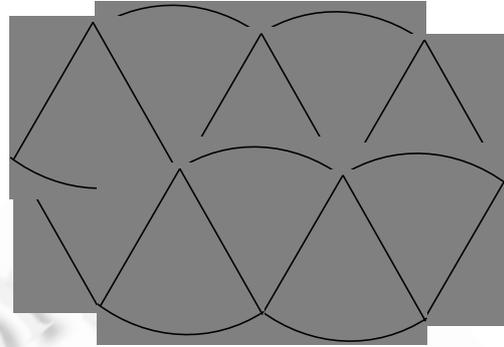


Fig.14 Tiled deployment of sector sense model

图 14 扇形感知模型的平铺部署方式

3. 两种部署方式的比较

在圆形部署方式中,所组成的圆形所包含的整个覆盖面积如下:

$$S_{who} = \frac{1}{2}r^2 \left[6 \left(\frac{\pi^2}{3} - \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) \right) + \left(\left\lceil \frac{2\pi}{\alpha} \right\rceil \times \alpha - 2\pi \right) \right] \quad (6)$$

每个节点的平均重叠面积为

$$\overline{S}_{cir} = S_{who} / \left\lceil \frac{2\pi}{\alpha} \right\rceil \quad (7)$$

在平铺部署方式中,每一个节点的平均重叠面积为

$$\overline{S}_{til} = \frac{1}{2} \times r^2 (\alpha - \sin(\alpha)) \quad (8)$$

验证结果如图 15 所示,x 轴表示感知扇形的夹角,y 轴表示节点平均重叠面积,虚线为扇形感知模型的平铺部署方式,实线为扇形感知模型的圆形部署方式.

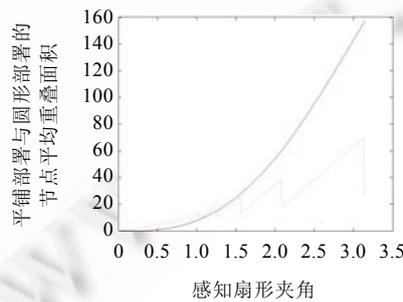


Fig.15 Deployments comparison of two sector sense models

图 15 扇形感知模型两种部署方式的比较

得出结论:当感知扇形的夹角小于 1.256 6 弧度(即 72°)时,平铺方式的节点平均重叠面积较小,则可以用较少的节点实现完全覆盖,所以应该选择平铺部署方式;当感知扇形的夹角大于 1.256 6 弧度(即 72°)时,平铺方式的节点平均重叠面积随着感知夹角的增加而迅速增加,圆形部署方式的节点平均重叠面积较小,应选择圆形部署方式;当感知扇形的夹角等于 1.256 6 弧度(即 72°)时,两种部署方式的节点平均重叠面积相同,为实现某目标区域的完全覆盖所用的节点数相同。

3.1.3 椭圆形感知模型的部署方式分析

在椭圆形感知模型网络中,用最少的节点来完全覆盖目标区域同样可以转化为最小化所有节点感知区域的重叠面积的问题,如图 16 所示。

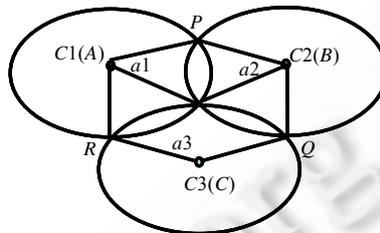


Fig.16 Deployment of ellipse sense model

图 16 椭圆形感知模型的部署方式

利用投影法,椭圆弓形 S_T 相当于圆形弓形 S_r 压缩为 b/a 所得的面积,公式如下:

$$S_T = S_r \times \frac{b}{a} \tag{9}$$

当 S_r 取最小值时, S_T 也得到最小值,这样就可以转换为求圆形重叠区域最小的问题.由文献[14]可知,当 3 个圆的中心构成 $\sqrt{3}r$ 的等边三角形时覆盖重叠最小,那么椭圆的中心构成的三角边长分别如下(假设椭圆的 a, b 已知): AB 经投影没改变,仍为 $D_{AB} = \sqrt{3}a$; CO 则变为 $D_{CO} = DR_{CO} \times \frac{b}{a}$; 已知 $DR_{CO} = \frac{3}{2}a$, 所以,

$$D_{AC} = \sqrt{D_{AO}^2 + D_{CO}^2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{a^2 + 3 \times b^2} \tag{10}$$

得出结论:椭圆形感知中心构成底为 $\sqrt{3}a$ 、边为 $\frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{a^2 + 3 \times b^2}$ 的等边三角形时,节点间的覆盖重叠最小。

3.2 随机部署的节点数量分析

在随机部署中,节点被随机均匀地抛撒在目标区域中,抛撒的节点个数直接影响到了目标区域被覆盖的概率. Liu 等人^[12,13]证明了在均匀随机部署中,目标区域中某个子区域被 N 个节点监测到的概率符合泊松点过程^[1]:

$$P[N(A) = k] = e^{-\lambda\mu(A)} \times \frac{(\lambda\mu(A))^k}{k!}, k \in N_0 \tag{11}$$

其中, A 表示目标区域; λ 表示传感器密度,即每单位面积包含的传感器个数; $\mu(A)$ 表示某个节点可以感知的面积; k 表示区域内监测到任意一点的传感器个数; N_0 表示非负整数.该理论可以应用到多重覆盖中。

由上面的理论可得不同的感知模型下节点估计方程,现以一重覆盖为例分别导出不同传感模型下的个数预测公式.已知节点感知面积为 $\mu(A)$,求区域 A 中任意一点至少被 1 个节点感知的概率为^[1]

$$f_{area} = P[N(A) \geq 1] = 1 - P[N(A) = 0] = 1 - e^{-\lambda\mu(A)} \tag{12}$$

$$\lambda(f_{area}) = -\frac{\ln(1 - f_{area})}{\mu(A)} \tag{13}$$

则已知椭圆感知区域面积为 πab 、圆形感知区域面积为 πR^2 、扇形感知区域面积为 αR^2 、面积为 S 的目标区域,

为了达到至少为 f_{area} 一重覆盖概率,至少所需要的传感器个数为

$$N(S) \geq S \times \lambda(f_{area}) = -\frac{\ln(1-f_{area})}{\mu(A)} \times S \quad (14)$$

当感知区域面积远小于目标区域面积时,在估计一重覆盖的节点个数时,公式(14)与公式(1)所得结果相同.证明如下(f 为公式(14)与公式(1)的比值):

$$f = N(S)/N = \left[-\frac{\ln(1-f_{area})}{\mu(A)} \times S \right] / \left[\frac{\ln(1-p)}{\ln(S-\alpha R^2) - \ln S} \right] = \frac{-S}{\mu(A)} \times [\ln(S-\alpha R^2) - \ln S] \quad (15)$$

由于 $\mu(A)=\alpha R^2$, 设 $s1 = \mu(A) = \alpha R^2 = \frac{S}{n}$,

$$f = -n \times \left[\ln \frac{S-\alpha R^2}{S} \right] = -n \times \left[\ln \left(1 - \frac{1}{n} \right) \right] = -\ln \left(1 - \frac{1}{n} \right)^n \quad (16)$$

由于对数公式中有如下公式:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{k}{n} \right)^n = e^k \quad (17)$$

当感知区域面积远小于目标区域面积时,即 n 趋于无穷大时,

$$f = \lim_{n \rightarrow \infty} \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{n} \right)^n \right] = -\ln(e^{-1}) = 1 \quad (18)$$

实验验证如图 17 所示,横坐标表示目标区域的面积对于感知区域面积的倍数,纵坐标表示由公式(14)所得的节点个数与由公式(1)所得的节点个数的比值.

但是,泊松点估计方式中 k 值可以任意取,能够应用到多重覆盖中;而 Ma 等人^[4]提出的估计方法是通过概率计算得来的,只能应用到一重覆盖中.

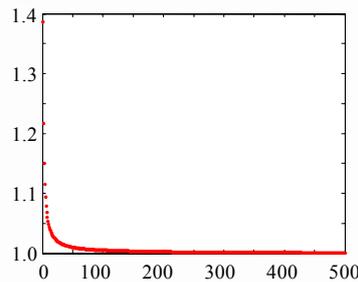


Fig.17 Comparison of two number estimations

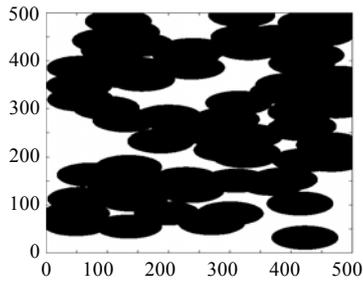
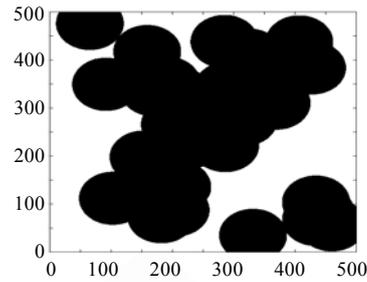
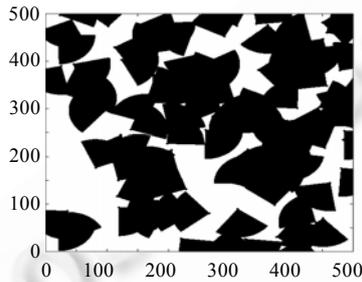
图 17 扇形感知模型两种部署方式的比较

4 仿真验证

本文对上述数量分析进行了仿真验证.

假设目标区域面积为 500×500 单位面积,当不同感知模型的感知区域面积分别为 2 500 单位面积,且满足目标区域覆盖率为大于等于 0.7 时,根据公式可求得节点个数分别大于等于 120 个.

实验假设随机抛撒上述数量节点,覆盖情况分别如图 18、图 19 和图 20 所示.并对多次实验结果取平均值,结果表明能够满足预期覆盖率.仿真结果见表 1,其中, P_1 为椭圆感知模型的覆盖率, P_2 为圆形感知模型的覆盖率, P_3 为扇形感知模型的覆盖率.

Fig.18 Coverage of ellipse sense model, $p=0.714$ 图 18 椭圆感知模型的覆盖情况, $p=0.714$ Fig.19 Coverage of circular sense model, $p=0.706$ 图 19 圆形感知模型的覆盖情况, $p=0.706$ Fig.20 Coverage of sector sense model, $p=0.683$ 图 20 扇形感知模型的覆盖情况, $p=0.683$ **Table 1** Simulation results**表 1** 仿真实验结果

	P_1	P_2	P_3
1	0.714	0.706	0.683
2	0.699	0.694	0.674
3	0.706	0.681	0.695
4	0.695	0.716	0.669
5	0.680	0.692	0.689
6	0.675	0.709	0.657
7	0.684	0.723	0.676
8	0.686	0.689	0.709
9	0.663	0.674	0.714
10	0.708	0.713	0.710
平均	0.691	0.700	0.688

5 结束语

本文通过对无线视频传感器网络应用进行分析,将应用分为 4 种类型,并针对不同的应用建立了不同的感知模型,然后对不同的感知模型在确定覆盖中的部署方式和在随机部署中的个数进行了详细的分析,并且进行了仿真验证,结论正确且符合实际应用.

致谢 在此,我们向对本文的工作给予支持和建议的同行,尤其是太原科技大学复杂系统与计算智能实验室的老师和同学表示感谢.

References:

- [1] Karl H, Willing A, Wrote; Qiu TS, *et al.*, Trans. Protocols and Architecture for Wireless Sensor Networks. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007 (in Chinese).
- [2] Akyildiz IF, Su W, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. Wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*, 2002,38(4): 393–422. [doi: 10.1016/S1389-1286(01)00302-4]
- [3] 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> [doi: 10.1360/jos172013]
- [4] Ma HD, Li 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 (MSN 2005). Berlin: Springer-Verlag, 2005. 721–731. [doi: 10.1007/11599463_70]
- [5] 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]
- [6] Cai Y, Lou W, Li M, Li X. Target-Oriented scheduling in directional sensor networks. In: Proc. of the IEEE Infocom. 2007. 1–9. [doi: 10.1109/INFCOM.2007.182]
- [7] Ai J, Abouzeid A. Coverage by directional sensors in randomly deployed wireless sensor networks. *Journal of Combinatorial Optimization*, 2006,11(1):21–41. [doi: 10.1007/s10878-006-5975-x]
- [8] Tezcan N, Wang W. 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]
- [9] Tezcan N, Wang W. Self-Orienting wireless multimedia sensor networks for maximizing multimedia coverage. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications 2008 (ICC 2008). 2008. 2206–2210. [doi: 10.1109/ICC.2008.421]
- [10] Adriaens J, Megerian S, Potkonjak M. Optimal worst-case coverage of directional field-of-view sensor networks. In: Proc. of the IEEE SECON. 2006. 336–345.
- [11] Soro S, Heinzelman W. On the coverage problem in video-based wireless sensor networks. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Broadband Communications, Networks, and Systems (BroadNets). Boston, 2005. [doi: 10.1109/ICBN.2005.1589704]
- [12] Liu B, Towsley D. On the coverage and detectability of large-scale wireless sensor networks. In: Proc. of the Modeling and Optimization in Mobile, Ad-Hoc and Wireless Networks. 2003.
- [13] Liu B, Towsley D. A study of the coverage of large-scale sensor networks. In: Proc. of the 2004 IEEE Int'l Conf. on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems. 2004. 475–483.
- [14] Zhang H, Hou J. Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks. *Ad Hoc Sensor Wireless Networks*, 2005,1(1-2):89–124.

附中文参考文献:

- [1] Karl H, Willing A, 著; 邱天爽, 等, 译. 无线传感器网络协议与体系结构. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [3] 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> [doi: 10.1360/jos172013]
- [5] 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):1152–1163. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1152.htm> [doi: 10.1360/jos181152]



赵静(1974—),女,河北定州人,博士,副教授,主要研究领域为无线传感器网络覆盖技术,目标跟踪.



曾建潮(1963—),男,博士,教授,博士生导师,CCF高级会员,主要研究领域为智能计算,微粒群算法,最优化计算.