

文章编号: 1001-0920(2011)10-1447-05

三维传感器网络部署、覆盖和连接问题研究

钟永信, 黄建国, 韩晶

(西北工业大学 航海学院, 西安 710072)

摘要: 针对三维传感器网络中节点最优部署问题进行研究. 通过分析常用规则多面体(如立方体和截顶八面体等)在三维空间的填充特点, 提出了网络节点按规则多面体部署时, 单位节点最大有效体积的计算方法; 同时利用该方法得到了网络区域保持充分覆盖且邻节点相连接时所需的最少节点数; 最后通过仿真比较了不同规则多面体的部署性能, 进而给出了在各种 r_c/r_s (r_c 为通信范围, r_s 为感测范围) 情况下的最优部署模式, 提高了网络节点的部署效率.

关键词: 三维传感器网络; 覆盖; 连接; 多面体; 最大有效体积

中图分类号: TP393

文献标识码: A

Research on deployment, coverage and connectivity in three dimensional sensor networks

ZHONG Yong-xin, HUANG Jian-guo, HAN Jing

(College of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China. Correspondent: ZHONG Yong-xin, E-mail: yongxin.zhong@126.com)

Abstract: To solve the problem of optimal deployment of nodes in three dimensional sensor networks, an algorithm of maximal efficient volume per node is presented by analyzing some popular deployment patterns of space-filling polyhedrons such as cube and truncated octahedron. This algorithm can calculate the minimal number of sensors needed to achieve both full coverage and connectivity of networks. Finally, the deployment performances of regular polyhedrons are compared by some simulations. Optimal deployment patterns under the condition of different values of r_c/r_s are obtained, where r_c is communication range and r_s is sensing range, and the deployment efficiency of networks is improved.

Key words: three dimensional sensor networks; coverage; connectivity; polyhedrons; maximal efficient volume

1 引言

部署、覆盖和连接是传感器网络研究的一项重要课题, 对网络中的节点进行合理有效的部署可以降低网络的成本, 提高网络的覆盖能力, 保持节点的连通性, 增强网络的可操作性以及改善网络的性能^[1]. 在二维传感器网络中, 研究了规则多边形的最优部署模式^[2-3], 当传感器节点通信范围 r_c 和感测范围 r_s 的比值大于且等于 $\sqrt{3}$ 时, 部署节点在正六边形的中心(相当于部署节点在正三角形的顶点)具有最优的覆盖和连接效果, 即以最少的节点数覆盖和连接一个平面; 而当 $r_c/r_s < \sqrt{3}$ 时, 部署节点在其他一些规则多边形(如正方形、正三角形和菱形)的中心可达到最优的覆盖和连接效果.

随着传感器网络的快速发展, 二维传感器网络在某些特定的场合不再适用, 如大气监测传感器网络和水声传感器网络通常以三维网络为背景^[4]. 文献[5]针对随机部署的三维传感器网络, 提出了覆盖漏洞的填补算法. [6]致力于三维传感器网络覆盖冗余节点的发现和减少. [7]提出了分布式部署方法, 通过调整节点的位置深度来减少节点的交叠区域, 从而达到网络的最大覆盖. [8]基于对 Reuleaux 四面体的研究, 得到网络 k -覆盖 ($k \geq 4$) 的最小空间节点密度并衡量网络的连接性. 而对于规则多面体的最优部署模式, [9]考虑了三维网络的充分覆盖和连接的问题, 通过计算和比较常用多面体的“体积商”得知: 当 $r_c/r_s \geq 4/\sqrt{5}$ 时, 截顶八面体的覆盖效果要优于立

收稿日期: 2010-05-13; 修回日期: 2010-07-01.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60972152); 中国博士后科学基金项目(20080441183).

作者简介: 钟永信(1980-), 男, 博士生, 从事水声传感器网络的研究; 黄建国(1946-), 男, 教授, 博士生导师, 从事水声通信、传感器网络等研究.

方体、正六棱柱和菱形十二面体. [10] 证明了截顶八面体具有最优的 14-连接和充分覆盖三维空间的特性. 但是当 $r_c/r_s < 4/\sqrt{5}$ 时, 规则多面体的最优部署模式仍是未知的, 考虑在实际情况下, 网络节点通信和感测范围的比值有可能是任意的, 有必要研究对于各种 r_c/r_s 情况下, 网络节点按规则多面体部署的覆盖和连接效果.

本文针对三维网络空间中如何部署传感器节点的位置使得网络保持充分覆盖和连接时所需节点数最少的问题进行研究. 首先对独立填充三维空间的规则多面体(立方体、正六棱柱、正三棱柱、菱形十二面体和截顶八面体)进行分析; 然后根据规则多面体的节点部署位置, 推导和计算单位节点的最大有效体积与 r_c/r_s 之间的关系表达式; 最后通过仿真得到在各种 r_c/r_s 比值情况下规则多面体的最优部署模式.

2 问题描述

假设传感器节点的通信模型和感测模型是按球状分布的, 分别称为通信球和感测球, 传感器节点位于球体的中心, 其通信范围为 r_c , 感测范围为 r_s , 且网络中所有节点具有相同的通信和感测范围. 同时假定网络规模较大, 传感器节点的部署不考虑目标区域的边界影响.

在静态的三维传感器网络空间 Ω 中, 令 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ 为 Ω 内有限传感器节点的集合, 节点 a_i 的通信球和感测球分别记为 $C(a_i)$ 和 $S(a_i)$, 并给出一些基本定义.

定义 1 (充分覆盖) 网络空间 Ω 中的任意一点 p 至少被一个传感器节点所覆盖, 即存在节点 $a_i \in A$, 使得 $d(p, a_i) \leq r_s$, 其中 $d(p, a_i)$ 表示点 p 和节点 a_i 间的欧氏距离.

定义 2 (邻节点相连接) 两个传感器节点 $a_i \in A$ 和 $a_j \in A$, 若 $S(a_i) \cap S(a_j) \neq \emptyset$ 且 $d(a_i, a_j) \leq r_c$, 则称邻节点 a_i 和 a_j 相连接. 其中: \emptyset 为空集, $d(a_i, a_j)$ 为节点 a_i 和 a_j 间的欧氏距离.

定义 3 (Voronoi 单元) 节点 $a_i \in A$, 存在集合 $B(a_i) = \{p \mid d(p, a_i) \leq d(p, a_j), P \in \Omega, \forall j \neq i\}$, 则 $B(a_i)$ 构成了三维空间的凸多面体区域, 称 $B(a_i)$ 为节点 a_i 的 Voronoi 单元, 并根据节点集 A 所形成的 Voronoi 单元集合可剖分三维空间^[11].

定义 4 (单位节点体积) 节点所对应的 Voronoi 单元的体积称为单位节点体积, 记为 V .

定义 5 (最大有效体积) 满足网络充分覆盖和邻节点相连接条件时, 最大的单位节点体积称为最大有效体积, 记为 V_{\max} .

根据上述假设和定义, 每个传感器节点的覆盖

区域是一个球体, 但由于球体不能在空间组成无缝且不重叠的连接, 不具备独立填充三维空间的特性. 而立方体、正六棱柱、正三棱柱、菱形十二面体和截顶八面体为独立填充三维空间的多面体^[9], 部署传感器节点在规则多面体的中心, 节点感测球所形成的 Voronoi 单元为该多面体. 由于 Voronoi 单元集合的空间剖分性, 只要每个传感器节点充分覆盖其所在的多面体 (Voronoi 单元), 网络中的节点集合即可充分覆盖整个网络区域, 从而达到以最少的节点数充分覆盖目标区域且保持网络连通的目的.

3 节点部署模式和最大有效体积计算

通过对立方体、正六棱柱、正三棱柱、菱形十二面体和截顶八面体进行分析和研究, 根据规则多面体的空间填充特点得到传感器节点的部署位置, 同时给出了满足网络充分覆盖且邻节点相连接的约束条件, 推导并计算单位节点的最大有效体积.

3.1 立方体

在三维空间, 部署传感器节点在各个立方体的中心, 节点感测球所形成的 Voronoi 单元为其所在的立方体, 同时由于立方体的空间对称性, 相当于传感器节点的部署位置为立方体的顶点. 设立方体的边长为 a , 则单位节点体积为 $V^C = a^3$. 为了充分覆盖目标区域, 每个传感器节点必须充分覆盖其所在的立方体, 即需满足 $\sqrt{3}a/2 \leq r_s$. 同时, 每个节点有 6 个相邻节点, 且距离均为 a , 则保持网络中邻节点相连接需满足 $a \leq r_c$, 因此节点部署在立方体的中心. 要达到网络的充分覆盖和邻节点相连接, 需要单位节点最大有效体积为 $V_{\max}^C = \{\min(2r_s/\sqrt{3}, r_c)\}^3$, 即

$$V_{\max}^C = \begin{cases} r_c^3, & 0 < \frac{r_c}{r_s} < \frac{2}{\sqrt{3}}; \\ \frac{8}{3\sqrt{3}}r_s^3, & \frac{r_c}{r_s} \geq \frac{2}{\sqrt{3}}. \end{cases} \quad (1)$$

3.2 正六棱柱

部署传感器节点在正六棱柱的中心, 节点感测球所形成的 Voronoi 单元为其所在的正六棱柱, 而传感器节点的部署位置为正三棱柱的顶点, 如图 1 所示. 设正六棱柱底面边长为 a , 高为 h , 则单位节点体积为 $V^H = 3\sqrt{3}a^2h/2$. 节点到其所覆盖的正六棱柱的顶点距离为 $\sqrt{a^2 + h^2}/4$, 则充分覆盖目标区域需满足 $\sqrt{a^2 + h^2}/4 \leq r_s$. 同样可以计算节点构成的正三棱柱底面边长为 $\sqrt{3}a$, 高为 h , 即每个节点在水平方向与 6 个邻节点的距离为 $\sqrt{3}a$, 垂直方向与 2 个邻节点的距离为 h , 保持网络中的邻节点相连接必须满足 $\sqrt{3}a \leq r_c$ 且 $h \leq r_c$. 接下来的目标是求满足式 (2) 约束条件时 V^H 的最大值, 即

$$a^2 + h^2/4 \leq r_s^2, \quad 0 < a \leq r_c/\sqrt{3}, \quad 0 < h \leq r_c. \quad (2)$$

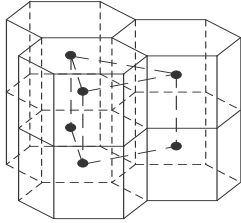


图 1 正六棱柱节点位置部署

如图 2 所示, 式 (2) 的约束条件构成了椭圆和矩形的相交区域, 并且由于 V^H 为 a 和 h 的递增函数, 其最大值点必定存在于相交区域的边界上 (在边界上总能够找到比相交区域内部任一点具有更大的 a 和 h 值的点), 且 B 和 C 分别为 \overline{BI} 和 \overline{CJ} 边界上 V^H 的最大值点, 所以问题简化为求 \overline{BC} 边界上 V^H 的最大值.

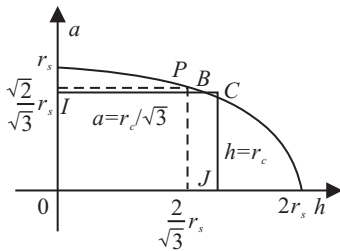


图 2 正六棱柱覆盖和连接的约束关系

首先计算 V^H 在椭圆边界上的最大值, 将椭圆方程代入 V^H 后, 得到

$$V^H = y(h) = 3\sqrt{3}r_s^2h/2 - 3\sqrt{3}h^3/8.$$

通过导数求极值

$$y'(h) = 3\sqrt{3}r_s^2/2 - 9\sqrt{3}h^2/8 = 0,$$

得到 $h = 2r_s/\sqrt{3}$ 且 $a = \sqrt{2}r_s/\sqrt{3}$ (图 2 中用点 P 表示), $y(h) = 2r_s^3$. 当点 P 位于 \overline{BC} 之间, 即 $r_c \geq \sqrt{2}r_s$ 时, $V_{\max}^H = 2r_s^3$. 由于当 $h > 2r_s/\sqrt{3}$ 时, $y(h)$ 为递减函数, 点 P 在 \overline{BC} 之外, 且矩形仍然与椭圆相交, 即 $\sqrt{12}r_s/\sqrt{7} \leq r_c < \sqrt{2}r_s$ 时, V^H 在点 B 得到最大值为 $\sqrt{3}r_c^2\sqrt{r_s^2 - r_c^2/3}$. 当矩形在椭圆的内部, 即 $r_c < \sqrt{12}r_s/\sqrt{7}$ 时, V^H 在矩形的右上顶点得到最大值为 $\sqrt{3}r_c^3/2$. 综上所述, 节点部署在正六棱柱的中心, 要达到网络的充分覆盖和邻节点相连接, 需要单位节点最大有效体积为

$$V_{\max}^H = \begin{cases} \frac{\sqrt{3}}{2}r_c^3, & 0 < \frac{r_c}{r_s} < \sqrt{\frac{12}{7}}; \\ \sqrt{3}r_c^2\sqrt{r_s^2 - \frac{r_c^2}{3}}, & \sqrt{\frac{12}{7}} \leq \frac{r_c}{r_s} < \sqrt{2}; \\ 2r_s^3, & \frac{r_c}{r_s} \geq \sqrt{2}. \end{cases} \quad (3)$$

3.3 正三棱柱

部署传感器节点在正三棱柱的中心, 相当于部署传感器节点在正六棱柱的顶点, 节点感测球所形成的 Voronoi 单元为其所在的正三棱柱. 设正三棱柱的底面边长为 a , 高为 h , 则单位节点体积为 $V^T =$

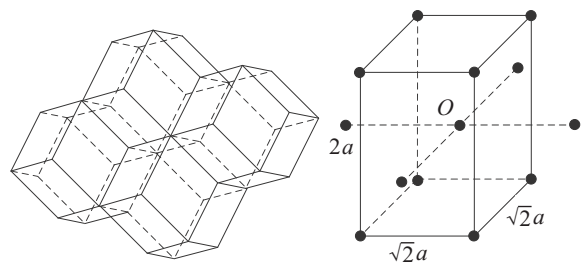
$\sqrt{3}a^2h/4$. 节点到其所覆盖的正三棱柱的顶点距离为 $\sqrt{a^2/3 + h^2/4}$, 则充分覆盖目标区域需满足 $\sqrt{a^2/3 + h^2/4} \leq r_s$. 同样可以计算节点构成的正六棱柱的底面边长为 $\sqrt{3}a/3$, 高为 h , 即每个节点在水平方向与 3 个邻节点的距离为 $\sqrt{3}a/3$, 垂直方向与 2 个邻节点的距离为 h , 保持网络中的邻节点相连接必须满足 $\sqrt{3}a/3 \leq r_c$ 且 $h \leq r_c$. 满足约束条件求最大值的过程与第 3.2 节类似, 此处不再详述. 通过计算得到部署节点在正三棱柱中心, 要达到网络的充分覆盖和邻节点相连接, 需要单位节点最大有效体积为

$$V_{\max}^T = \begin{cases} \frac{3\sqrt{3}}{4}r_c^3, & 0 < \frac{r_c}{r_s} < \frac{2}{\sqrt{5}}; \\ \frac{3\sqrt{3}}{4}r_c\left(r_s^2 - \frac{r_c^2}{4}\right), & \frac{2}{\sqrt{5}} \leq \frac{r_c}{r_s} < \frac{2}{\sqrt{3}}; \\ r_s^3, & \frac{r_c}{r_s} \geq \frac{2}{\sqrt{3}}. \end{cases} \quad (4)$$

3.4 菱形十二面体

取两个相同的立方体, 将其中一个立方体按 4 条对角线切割成完全相等的 6 个正四棱锥, 分别叠加在另一个立方体的 6 个面, 构成菱形十二面体^[9]. 它具有 12 个全等的菱形面, 在三维空间的堆积如图 3(a) 所示. 将节点部署在菱形十二面体的中心, 节点感测球所形成的 Voronoi 单元为其所在的菱形十二面体. 为了计算方便, 设立方体的边长为 a , 则两个立方体的体积之和为菱形十二面体的体积, 即单位节点体积为 $V^D = 2a^3$. 节点到其所覆盖的菱形十二面体最远顶点距离为 a , 因此充分覆盖目标区域需满足 $a \leq r_s$. 而传感器节点的部署位置如图 3(b) 所示, 即每个节点 (以图 3(b) 中的节点 O 为例) 均有 12 个相邻节点, 其中 8 个部署在长方体的顶点, 另外 4 个部署在相邻长方体的中心, 可计算每个中心节点到其 12 个邻节点的距离均为 $\sqrt{2}a$, 保持网络邻节点相连接需满足 $\sqrt{2}a \leq r_c$. 因此节点部署在菱形十二面体的中心, 要达到网络的充分覆盖和邻节点相连接, 需要单位节点的最大有效体积 $V_{\max}^D = 2\{\min(r_s, r_c/\sqrt{2})\}^3$, 即

$$V_{\max}^D = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}r_c^3, & 0 < \frac{r_c}{r_s} < \sqrt{2}; \\ 2r_s^3, & \frac{r_c}{r_s} \geq \sqrt{2}. \end{cases} \quad (5)$$



(a) 三维空间堆积

(b) 节点位置部署

图 3 菱形十二面体

3.5 截顶八面体

正八面体截去6个顶角后得到截顶八面体,其14个面分别由6个正方形和8个正六边形构成,在三维空间的堆积如图4(a)所示.将节点部署在截顶八面体的中心,节点感测球所形成的Voronoi单元为其所在的截顶八面体.设每个面的边长为 a ,可通过正八面体计算截顶八面体的体积,即单位节点体积为 $V^O = 8\sqrt{2}a^3$.节点到其所覆盖的截顶八面体顶点的距离均为 $\sqrt{10}a/2$,因此充分覆盖目标区域需满足 $\sqrt{10}a/2 \leq r_s$.而传感器节点部署位置如图4(b)所示,每个节点(以图4(b)中的节点 O 为例)均有14个相邻节点,其中8个部署在立方体的顶点,另外6个部署在相邻立方体的中心,可计算每个中心节点到立方体顶点的距离均为 $\sqrt{6}a$,到相邻立方体中心节点的距离为 $2\sqrt{2}a$,为了保持网络邻节点相连接需满足 $2\sqrt{2}a \leq r_c$.因此节点部署在菱形十二面体的中心,要达到网络充分覆盖和邻节点相连接,需要单位节点最大有效体积 $V_{\max}^O = 8\sqrt{2}\{\min(2r_s/\sqrt{10}, r_c/2\sqrt{2})\}^3$,即

$$V_{\max}^O = \begin{cases} \frac{1}{2}r_c^3, & 0 < \frac{r_c}{r_s} < \frac{4}{\sqrt{5}}; \\ \frac{32}{5\sqrt{5}}r_s^3, & \frac{r_c}{r_s} \geq \frac{4}{\sqrt{5}}. \end{cases} \quad (6)$$

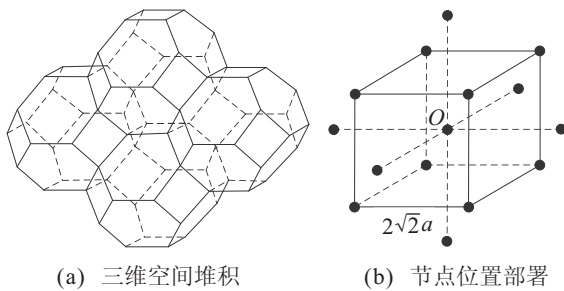


图4 截顶八面体

4 仿真分析

通过第3节对常用规则多面体的分析,得到传感器节点按立方体、正六棱柱、正三棱柱、菱形十二面体和截顶八面体部署时,充分覆盖目标区域且保持邻节点相连接的最大有效体积 V_{\max} .在不考虑边界影响的情况下,充分覆盖和连接目标区域 V_E 所需传感器节点数为 $N = V_E/V_{\max}$.

为了得到规则多面体的最优部署模式,基于Matlab仿真软件对各种多面体的部署性能进行分析比较.仿真过程中,网络目标区域 V_E 选取为 $1000\text{m} \times 1000\text{m} \times 1000\text{m}$ 的三维空间,设置传感器节点的感测范围 $r_s = 75\text{m}$,通信范围 $60\text{m} \leq r_c \leq 150\text{m}$,使得 $0.8 \leq r_c/r_s \leq 2$ 包含 V_{\max} 中的各个分界点情况.

图5给出了对于不同的规则多面体部署模式,网络充分覆盖和连接目标区域所需的节点数随 r_c/r_s 变化的曲线.从图5可以看出,随着 r_c/r_s 的增加,单位

节点最大有效体积增大,网络所需的节点数减少,但在 r_c/r_s 到达一定的值之后保持不变.进一步比较不同多面体部署模式在各种 r_c/r_s 情况下所需的节点数,得出以下结论:

- 1) 当 $0 < r_c/r_s \leq 0.990$ 时,正三棱柱所需的节点数最少,为最优的部署模式;
- 2) 当 $0.990 \leq r_c/r_s \leq 1.211$ 时,立方体所需的节点数最少,为最优的部署模式;
- 3) 当 $1.211 \leq r_c/r_s \leq 1.414$ 时,正六棱柱所需的节点数最少,为最优的部署模式;
- 4) 当 $1.414 \leq r_c/r_s \leq 1.587$ 时,正六棱柱和菱形十二面体所需节点数相同且最少,为最优的部署模式;
- 5) 当 $r_c/r_s \geq 1.587$ 时,截顶八面体所需的节点数最少,为最优的部署模式.

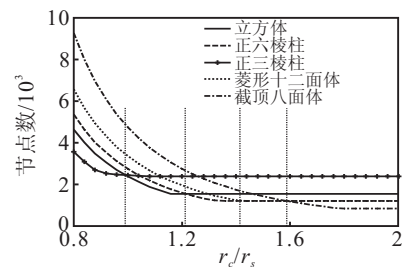


图5 节点数 r_c/r_s 变化曲线

表1给出了在不同的 r_c/r_s 区间,各种规则多面体部署与该区间内最优部署模式所需的节点数的比值,其中 N_C, N_H, N_T, N_D 和 N_O 分别代表网络按立方体、正六棱柱、正三棱柱、菱形十二面体和截顶八面体部署时所需的节点数, N_{OP} 为该 r_c/r_s 区间内最优部署模式所需的节点数.从表1中可以看出,根据 r_c/r_s 的不同取值,规则多面体部署与最优部署所需节点数的比值在某个范围内连续变化或者为某个常数.如当 $1.211 \leq r_c/r_s \leq 1.414$ 时,正三棱柱所需节点数为该区间内最优部署模式正六棱柱所需节点数的1.54~2倍($r_c/r_s = 1.211$ 时, $N_T/N_{OP} = 1.54$; $r_c/r_s = 1.414$ 时, $N_T/N_{OP} = 2$);而当 $r_c/r_s \geq 1.587$ 时,正三棱柱所需节点数均为该区间内最优部署模式截顶八面体所需节点数的2.862倍.进一步观察表1发现,对于任意给定的 r_c/r_s ,网络达到充分覆盖和邻节点相连接时,采用最优的多面体部署模式相比于其他非最优的多面体部署模式,在很大程度上节省了传感器节点的部署数量.

上述结果表明,在三维传感器网络空间中,本文提出的单位节点最大有效体积的计算方法可以得到规则多面体的最优部署模式.对于任意给定的 r_c/r_s 比值,根据最优部署模式进行节点部署有效地减少了传感器节点的使用数量,提高了网络节点的部署效率.

表 1 各种规则多面体部署与最优部署所需节点数的比值

| r_c/r_s | N_C/N_{OP} | N_H/N_{OP} | N_T/N_{OP} | N_D/N_{OP} | N_O/N_{OP} |
|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| (0, 0.990] | 1~1.299 | 1.155~1.5 | 1 | 1.414~1.837 | 2~2.598 |
| [0.990, 1.211] | 1 | 1~1.155 | 1~1.54 | 1.225~1.414 | 1.732~2 |
| [1.211, 1.414] | 1~1.299 | 1 | 1.54~2 | 1~1.225 | 1.414~1.732 |
| [1.414, 1.587] | 1.299 | 1 | 2 | 1 | 1~1.414 |
| [1.587, +∞) | 1.859 | 1.431 | 2.862 | 1.431 | 1 |

5 结 论

本文根据常用规则多面体的节点部署模式, 提出了单位节点最大有效体积的计算方法, 从而得到对于任意给定的 r_c/r_s 比值情况下, 网络要达到充分覆盖且保持邻节点相连接所需最少的节点数. 通过仿真比较规则多面体的部署性能得出最优的部署模式, 从而提高了网络节点的部署效率, 为三维传感器网络的发展和应用奠定了基础.

参考文献(References)

- [1] Li J, Andrew L, Foh C H, et al. Connectivity, coverage and placement in wireless sensor networks[J]. Sensors, 2009, 9(10): 7664-7693.
- [2] Bai X L, Kumar S, Xuan D, et al. Deploying wireless sensors to achieve both coverage and connectivity[C]. Proc of ACM MobiHoc. Florence: ACM Press, 2006: 131-142.
- [3] Bai X L, Yun Z Q, Xuan D. Deploying four-connectivity and full-coverage wireless sensor networks[C]. Proc of IEEE Infocom. Phoenix: IEEE Press, 2008: 296-300.
- [4] Pompili D, Melodia T, Akyildiz I F. Three-dimensional and two-dimensional deployment analysis for underwater acoustic sensor networks[J]. Elsevier J of Ad Hoc Networks, 2009, 7(4): 778-790.
- [5] Watfa M, Commuri S. A coverage algorithm in 3D wireless sensor networks[C]. The 1st Int Symposium on Wireless Pervasive Computing. Phuket: IEEE Press, 2006: 10-16.
- [6] Rao L, Liu W Y, Guo P. A coverage algorithm for three-dimensional large-scale sensor network[C]. Intelligent Signal Processing and Communication Systems. Xiamen: IEEE Press, 2007: 420-423.
- [7] Akkaya K, Newell A. Self-deployment of sensors for maximized coverage in underwater sensor networks[J]. Elsevier J of Computer Communications, 2009, 32(7): 1233-1244.
- [8] Ammari H M, Das S K. A Study of k -coverage and measures of connectivity in 3D wireless sensor networks[J]. IEEE Trans on Computers, 2010, 59(2): 243-257.
- [9] Alam S N, Haas Z J. Coverage and connectivity in three-dimensional networks[C]. Proc of ACM MobiCom. Los Angeles: ACM Press, 2006: 346-357.
- [10] Bai X L, Zhang C L, Xuan D, et al. Full-coverage and k -connectivity($k=14,6$) three dimensional networks[C]. Proc of IEEE Infocom. Rio de Janeiro: IEEE Press, 2009: 388-389.
- [11] Aurenhammer F, Klein R. Handbook of computational geometry[M]. Amsterdam: North Holland Press, 2000: 201-290.
- [46] Cheng S W, Garlan D. Software architecture based adaptation for pervasive systems[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2002, 2299: 67-82.
- [47] Chen H, Zhou C J. Management of the reconfigurable protocol stack based on SDL for networked control systems[J]. Information Technology J, 2010, 9(5): 849-863.
- [48] Kandasmy N, Hayes J P, Murray B T. Tolerating transient faults in statically scheduled safety-critical embedded systems[C]. Proc of the 18th IEEE Symp on Reliable Distributed Systems. Lausanne, 1999: 212-221.
- [49] 姚鑫骅, 傅建中, 陈子辰, 等. 面向数控系统的优化调度算法及容错策略研究[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(4): 768-776.
- (Yao X H, Fu J Z, Chen Z C, et al. Optimized scheduling algorithm oriented to numerical control system[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2007, 13(4): 768-776.)
- [50] Wang H J. ICEBERG: An internet-core network architecture for integrated communications[J]. IEEE Personal Communications, 2000, 7(4): 10-19.
- [51] Stringfellow M V, Leveson N G, Owens B D. Safety-driven design for software-intensive aerospace and automotive systems[J]. Proc of the IEEE, 2010, 98(4): 515-525.

(上接第1446页)