

基于粒子群的传感器空间覆盖优化方法

张 满, 贾云璐, 林 杰

(中国工程物理研究院 机械制造工艺研究所, 四川 绵阳 621000)

摘 要:覆盖度作为评价视频监控任务质量的重要指标, 如何提升任务区域的监测覆盖度是文中研究的主要问题。视频监控作为传感器的一种, 现有传感器网络覆盖增强方法一般集中于二维平面区域的研究, 由于视频监控任务的特殊性, 需要对二维平面上方的区域具有较好的监测, 所以定义了三维视频传感器在空间中的模型结构, 并分离传感器在水平方向上的位置及偏向角与竖直方向上的俯仰角两个方向上的影响因素。通过传感器自身参数及布置高度优化最佳俯仰角, 使得单个视频传感器的可视范围达到最佳。在此基础上通过粒子群算法优化传感器位置及水平偏向角, 从而使得对三维空间内的覆盖度最大化。通过仿真实验表明, 该算法使得空间中的覆盖度显著提高, 证明了算法的有效性。

关键词:传感器网络; 粒子群优化算法; 空间覆盖度; 三维模型; 优化部署

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2021)08-0204-05

doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2021.08.035

An Approach of Optimizing Sensor Spatial Coverage Based on PSO

ZHANG Man, JIA Yun-lu, LIN Jie

(Institute of Machinery Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621000, China)

Abstract: Coverage is an important indicator for evaluating the quality of video surveillance tasks. How to improve the surveillance coverage of the task area is the main issue studied in this paper. As a type of video surveillance, the existing sensor network coverage enhancement methods generally focus on the study of the two-dimensional plane area. Due to the particularity of the video surveillance task, the area above the two-dimensional plane requires to be better monitored, therefore we define one model structure of three-dimensional video sensor and separate the influence factors of the sensor in horizontal and vertical direction. By tuning parameters and layout height of sensors to obtain the best pitch angle, a single video sensor can reach the best visual range. On the basis, the position of the sensor and optimization of the horizontal deflection angle is optimized by the particle swarm algorithm, as a result, the maximal coverage of three-dimensional space is obtained. Simulation experiments show that the proposed algorithm significantly improves the coverage in the space, which proves its effectiveness.

Key words: sensor network; particle swarm optimization; spatial coverage; three-dimensional model; optimized deployment

0 引 言

视频监控作为日常安防的重要手段, 其在任务区域的有效覆盖率又是评价服务质量的重要指标。目前大多数的研究都是基于传感器网络的覆盖问题, 监控摄像机属于传感器的一种类型, 所以可以借鉴传感器网络覆盖问题的解决方法展开研究。当前对于传感器网络覆盖控制的研究大多数是基于二维模型^[1-4], 少部分的三维传感器模型是将三维空间问题约束到二维区域来解决^[5-7]。但是由于视频监控任务的特殊性, 其需要对一定高度范围内的区域进行较好的检测, 例如对于人就需要检测从上到下等一系列特征, 基于二维的传感器感知模型及算法不能满足视频监控的任务

要求。

该文通过借鉴关于传感器的研究, 提出一种适用于监控摄像机的三维模型并通过算法增强监控区域的覆盖度。吴帅^[8]与童海燕^[9]提出的是一种三维全向的球形覆盖模型, 并分别通过粒子群算法与虚拟力算法使得球形传感器在 xyz 三个方向上均匀分布。作者虽然提出了三维的传感器模型, 但是该模型属于全向的模型, 由于实际生活中监控摄像机模型的限制, 不能直接应用该模型。熊永华^[10]通过粒子群智能算法对感知半径可调的有向扇形传感器进行覆盖优化。李娜^[11]针对监控区域存在障碍物的情况, 引入避障策略, 提出基于虚拟力的传感器网络覆盖优化算法。蒋

收稿日期: 2020-09-21

修回日期: 2021-01-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51705485)

作者简介: 张 满(1994-), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能安防。

鹏^[12]基于二维扇形模型提出了一种虚拟力导向的粒子群摄像头网络覆盖增强策略,结合了虚拟力与粒子群算法来进行传感器的布置。Peng J 与肖甫^[13-14]使用的是传统的三维传感器模型,作者将关于传感器位姿的方向正交分解为俯仰角和偏向角,在传感器自身参数的限制下,调整单个传感器的俯仰角使得传感器在地面上的投影梯形面积最大化,再通过调整多传感器的偏向角使得传感器的覆盖度最大化。这两篇文献中所使用的传感器节点模型,与视频监控摄像机的任务要求相比较,并不能满足对具有一定高度信息的目标进行检测。

总结已有文献,现有的传感器模型大多都集中于二维平面的感知范围,并没有考虑一定高度范围内的信息获取。针对现有问题,结合监控摄像机的实际情况与上述文献中的传感器模型,该文考虑一定高度的传感器模型,同时假设传感器同构且布置在同一高度平面内,将传感器的布置分为对单个传感器的可视范围最大的俯仰角调整与通过智能算法对多个传感器调整其位置与朝向,最终使得在给定的区域范围内减少重叠区域的覆盖于盲区,提高覆盖率。

1 问题分析

1.1 视频传感器感知模型

参考文献[8]中的球形传感器模型与文献[13-14]中的传统三维模型可得,在三维现实场景中,视频传感器模型可以感知到传感器为中心最大感知距离为半径的球形区域;同时结合实际情况,监控摄像机存在最大水平视角与最大垂直视角的限制,所以将传感器的模型定义为底面为球形其余四个面为扇形的立体图形,如图1所示。

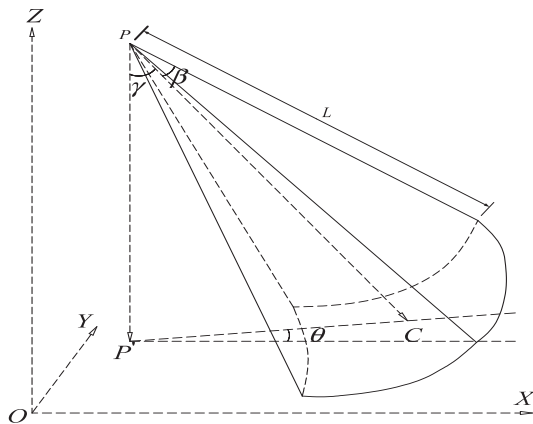


图1 空间感知模型

定义一:传感器模型与参数。

在三维传感器模型中,三维传感器节点的感知模型可以表述为 $(P, \vec{C}, \alpha, \beta, L, H)$,各参数在图1、图2中标识出。其中 $P = (x, y, z)$ 表示的是传感器节点在

三维空间中的位置坐标; $\vec{C} = (\theta, \gamma)$ 表示的是传感器的主感知方向;图中PC为传感器的中心线, θ 为PC与x轴的夹角,表示传感器在水平方向上的偏向角, γ 为PC与z轴负方向的夹角,表示传感器在垂直方向上的偏向角; 2α 与 2β 分别表示传感器节点的水平方向的最大感知角度与垂直方向的最大感知角度; L 表示传感器的最大感知范围,即节点P到球形底面的距离; H 为任务要求的监测高度,即平面 $A_1A_2A_3A_4$ 与平面 $B_1B_2B_3B_4$ 之间的距离。

定义二:定义可视区域范围与各坐标点。

平面 $A_1A_2A_3A_4$ 为传感器可见区域在地面的投影为扇形 PA_3A_4 截去三角形 PA_1A_2 所剩下的区域,面 $B_1B_2B_3B_4$ 为任务要求高度平面,为一等腰梯形。由于监控任务的特殊性,该文将一定高度的目标可被完全检测的区域定义为有效三维监测区域,如图2中的立方体 $A_1A_2A_3A_4B_1B_2B_3B_4$,其中上下两个面相互平行, A_1B_1 、 A_2B_2 、 A_3B_3 、 A_4B_4 四条边都垂直于上下两底。

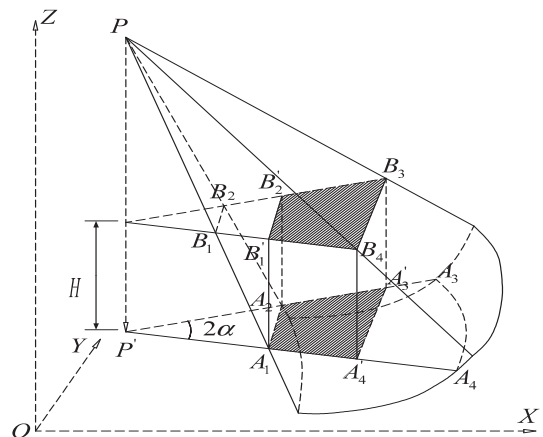


图2 有效感知区域

对于单个传感器来说,其偏向角所在平面与俯仰角所在平面相互垂直,调整传感器的偏向角度并不能影响传感器的有效感知区域。因此在传感器高度固定的情况下,影响单个传感器有效感知区域的因素为传感器布置的俯仰角度。

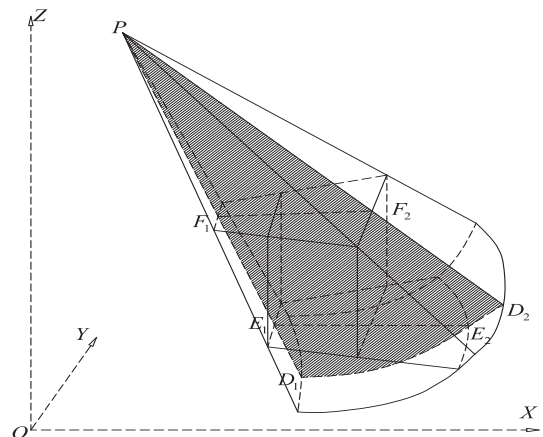


图3 三维感知模型截面

如图3所示,面 PD_1D_2 为传感器整体可视范围在坐标系 xoz 面上的截面,由于传感器可视范围的底面为球形,面 PD_1D_2 为扇形。通过调整传感器的俯仰角度影响的是上交面梯形的上下两底之间的距离 F_1F_2 与下交面两底之间的距离 E_1E_2 ,所以该文通过分析在截面 PD_1D_2 内, F_1F_2 与 E_1E_2 随俯仰角变化的关系,进而分析出最佳俯仰角使得传感器的有效三维感知区域最佳。

1.2 视频传感器的覆盖增强分析

为了方便计算,将监控区域离散化为每隔 $\Delta x \Delta y \Delta z$ 选取一个离散点,这样将连续空间覆盖问题就转化为离散空间的覆盖问题。假设空间离散后对应的点集为 Ω ,所有至少被一个传感器有效空间覆盖的点的集合为 Ω' ,则覆盖区域的覆盖率 η 定义为:

$$\eta = \frac{\|\Omega'\|}{\|\Omega\|} \quad (1)$$

假设对区域布撒 n 个传感器,第 i 个传感器的参数 $T_i = \{p_i, C_i\}$ 包括传感器的位置 $P_i(x, y, z)$,传感器的朝向 $C_i(\lambda, \theta)$,则覆盖增强是对所有变量组 $\eta(T_1, T_2, \dots, T_n) \geq \eta(T_1, T_2, \dots, T_n)$ 。

2 覆盖增强策略

2.1 基于单个传感器俯仰角调节

为了便于研究,同时结合现实世界的设备,假设所有视频传感器同构且布置在相同高度的平面之内。由图4可知,该文通过分析在扇形 PD_1D_2 中 F_1F_2 与 E_1E_2 随俯仰角变化的关系来求得传感器的最佳俯仰角度。

由于在直角三角形 $PP'E_2$ 中, PP' 为传感器的布置高度 Z , PE_2 为传感器的最大可视距离 L ,这两个值不会随着传感器的俯仰角度的变化而变化。

$$E_1E_2 = P'E_2 - P'E_1 = \sqrt{L^2 - Z^2} - Z \cdot \tan(\gamma - \beta) \quad (2)$$

$$F_1F_2 = (Z - H) \tan(\gamma + \beta) - (Z - H) \tan(\gamma - \beta) \quad (3)$$

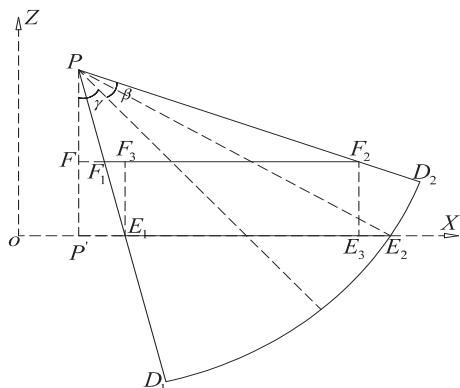


图4 感知模型截面

由于有效检测区域为竖直空间,所以有效区域为

在 xoz 面上的截面 $E_1E_3F_2F_3$,其中:

$$F_3F_2 = E_1E_3 = (Z - H) \tan(\gamma + \beta) - Z \tan(\gamma - \beta) \quad (4)$$

通过对上式中的 γ 求导得:

$$E_1E_3' = (Z - H) \sec^2(\gamma + \beta) - Z \sec^2(\gamma - \beta) \quad (5)$$

根据实际情况分析,一般布置情况下有 $(\gamma + \beta) > 45^\circ$, $(Z - H) > 0.5Z$,当 $(\gamma + \beta) > 45^\circ$ 时 $\sec^2(\gamma + \beta) > 2$,所以有 $(Z - H) \sec^2(\gamma + \beta) > Z$;而 $(\gamma - \beta)$ 的值一般情况下较小,且保持 $\sec^2(\gamma - \beta) \approx 1$,所以有 $E_1E_3' = (Z - H) \sec^2(\gamma + \beta) - Z \sec^2(\gamma - \beta) \geq 0$ 。

通过分析可得, F_3F_2 与 E_1E_3 为随着俯仰角 γ 的递增函数,当点 E_3 与 E_2 重合的时候, F_3F_2 与 E_1E_3 达到最大值,即有效监测区域值最大。

当点 E_3 与 E_2 重合时有:

$$(Z - H) \tan(\gamma + \beta) - \sqrt{L^2 - Z^2} = 0 \quad (6)$$

通过上述公式可求得传感器节点的最佳俯仰角。

2.2 多传感器位置及偏向角调节

通过俯仰角优化后的传感器空间中的最佳有效覆盖区域如图5所示,进一步调整多个传感器的位置与偏向角度使得对区域的覆盖范围最大化,对于偏向角与位置的优化问题是一个NP-hard问题。粒子群优化算法作为群体智能进化算法,具有求解速度快、质量高等优势,因此将粒子群智能算法引入传感器覆盖增强中^[14]。该文以传感器覆盖率为优化目标,通过粒子群算法搜索传感器的全局最优分布,调整传感器的位置与水平方向角来降低重叠感知区域与检测盲区,实现传感器的覆盖增强。

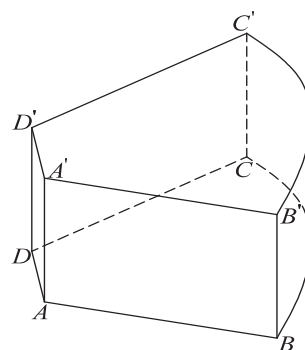


图5 有效感知区域

图中的立体图形的上下两底相互平行,由于图形完全竖直,两底之间的距离为任务要求检测的高度,所以对于图5中的立体图形在空间中的布置可以简化为平面 $ABCD$ 在任务要求的水平面中的布置。

假设在给定的区域内随机布置传感器数量为 Num 个,则节点的初始解向量空间为 $a_1(Q_{11}, Q_{12}, \dots, Q_{1\text{Num}})$,由于传感器的俯仰角度与高度已经确定,所以 $a_{1d} = Q_{1d}(x_{1d}, y_{1d}, \theta_{1d})$ 为每个传感器在空间中的水平位

置与水平俯仰角。设置粒子群的规模数为 n , 搜索空间为 (a_1, a_2, \dots, a_n) 。

粒子 i 的目标函数为:

$$f_i = \eta(a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{iNum}) \quad (7)$$

目标函数 f_i 表示对应的粒子 a_i 在 Num 个传感器下的空间覆盖度。

计算粒子规模内的最大目标函数值并记录为全局最优值:

$$f_{\max} = \max(f_1, f_2, \dots, f_n) \quad (8)$$

粒子群的迭代函数为:

$$\begin{cases} v_{id}(t+1) = \omega \cdot v_{id}(t) + c_1 \cdot r_1 \cdot (g_{ad} - a_{id}) + c_2 \cdot r_2 \cdot (p_{id} - a_{id}) \\ a_{id}(t+1) = a_{id}(t) + v_{id}(t+1) \end{cases} \quad (9)$$

其中, p_{id} 为粒子 i 的历史最佳情况下的传感器 d 的位置参数, g_{ad} 为粒子全局最佳情况下对应的传感器 d 的位置参数, 设初始值为初始情况下的值作为当前每个粒子的最优解, 并记录当前位置作为局部最优位置。 $a_{id}(t)$ 与 $v_{id}(t)$ 分别为第 t 次迭代中粒子 i 的传感器位置参数与位置参数的改变量。 ω 为惯性因子, 体现了第 $t+1$ 次迭代的 v_{id} 被上一代 v_{id} 影响的大小。通过对 ω 进行改进, 使得在迭代初期 ω 的值基本不变, 非常有利于全局搜索。而后期变化缓慢, 更利于得到或者接近全局最优值^[15]。其中 t 为当前的迭代次数, r_1, r_2 为 $[0, 1]$ 之间的随机数, c_1, c_2 为学习因子, 分别调节粒子历史最优与全局最优的影响程度。

粒子群算法流程如下:

步骤一: 初始化节点位置 (x_i, y_i) 、数量 Num、水平朝向角度 θ 、区域范围、粒子维度 D 、规模 N 、迭代次数, 初始化每个粒子, 每个粒子是 Num 个传感器在给定区域的布置, 而每个传感器又包括三个维度的解, 即每个粒子的解的维度为 3 Num 。

步骤二: 判断是否满足终止条件, 如果满足, 则算法结束, 否则继续。

步骤三: 利用式(9)更新粒子群算法中的粒子位置与速度。

步骤四: 计算各粒子的目标函数值即区域的覆盖率 η 。

步骤五: 更新各粒子的历史最佳位置和全局最佳位置。

步骤六: 返回步骤二。

3 仿真实验及分析

在 MATLAB R2018a 环境下进行仿真实验。在 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ 的区域内初始均匀随机布置 60 个视频传感器, 且传感器同构。将传感器初始参数设置为最大感知距离 10 m, 布置高度 5 m, 要求有效检测高度 2

m, 传感器的水平最大视角与垂直最大视角 $2\alpha, 2\beta$ 分别为 $\frac{\pi}{3}$ 。

则通过传感器俯仰角调整公式(6)可得最佳俯仰角 $\gamma = 40.9^\circ$, 之后求得有效覆盖面的各参数代入粒子群算法。算法训练过程如图 6 所示。

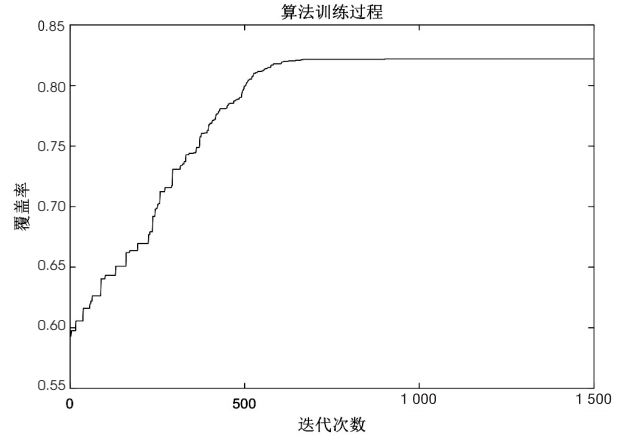


图6 算法训练过程

通过实验分析, 在传感器的初始布置图 7 中, 传感器的布置有些区域较为密集, 有些区域则较为稀疏, 覆盖率为 59.5%。如图 8 所示, 通过 PSO 算法调整传感器的位置与朝向, 传感器的布置均匀, 同时覆盖率也提升为 82%, 覆盖率提升了 22.5 个百分点, 说明通过该算法可以有效地提高传感器在空间中的覆盖率。

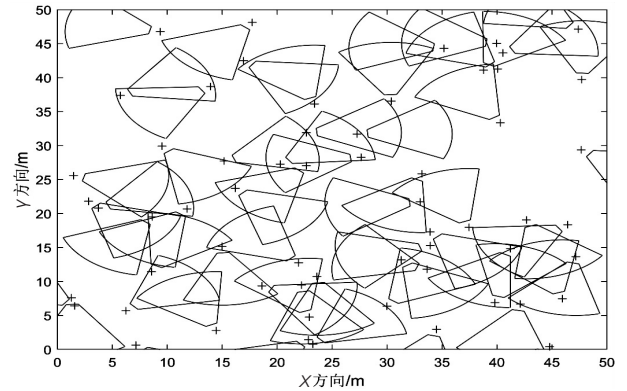


图7 初始布置图

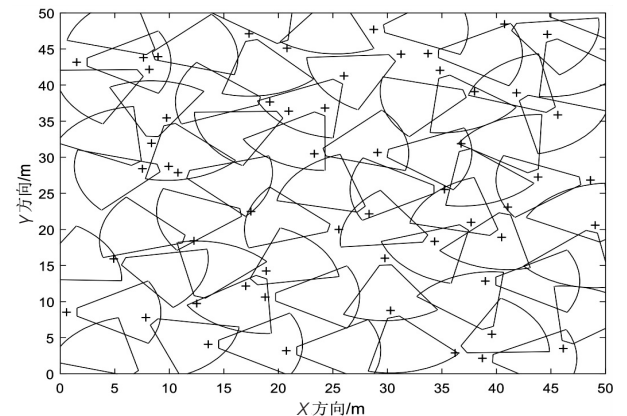


图8 调整后分布图

同时在感知区内通过算法调整不同的节点数所对应的覆盖度的变化,由图 9 可知,当节点数超过 80 个之后,覆盖率随节点的变化变得缓慢。由文献[14]实现了只调节传感器水平偏向角而不调节传感器位置的算法 TDPCA,对比可知,对位置及水平偏向角的调节结果优于只调节传感器水平偏向角的结果。由图中点画虚线还可以得出,只调节传感器水平偏向角的算法结果的波动性较大,这是由于该算法比较依赖传感器布置的初始位置。

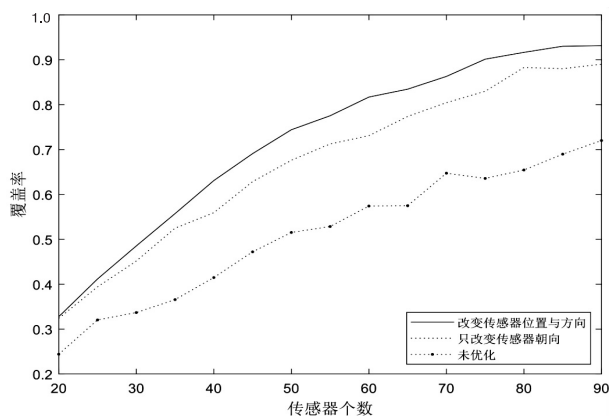


图 9 不同算法对比

4 结束语

对三维空间内视频传感器覆盖度的增强进行了研究,结合已有模型提出三维有效模型,并将覆盖度优化问题分为水平面与竖直面两个方向。通过任务要求高度与传感器的自身参数确定传感器的最佳俯仰角,而后通过粒子群算法调整多传感器水平方向上的位置及水平偏向角,最终使得多传感器的覆盖度得到优化,并通过仿真实验验证了该算法的有效性。

参考文献:

- [1] WANG Y, CAO G. On full-view coverage in camera sensor networks[C]//2011 proceedings IEEE INFOCOM. Shanghai, China; IEEE, 2011.
- [2] HRSTER E, LIENHART R. Optimal placement of multiple visual sensors[C]//Multi-camera networks. Massachusetts: Academic Press, 2009: 117-138.
- [3] TAO Dan, MA Huadong, LIU Liang. Coverage-enhancing algorithm for directional sensor networks[M]//Mobile ad-hoc and sensor networks. Hong Kong, China; Springer, 2006: 256-267.
- [4] 陶 丹, 孙 岩, 陈后金. 视频传感器网络中最坏情况覆盖检测与修补算法[J]. 电子学报, 2009, 37(10): 2284-2290.
- [5] MING A, CHEN X. Sensor planning method for visual tracking in 3D camera networks[J]. 系统工程与电子技术: 英文版, 2014(6): 1107-1116.
- [6] 徐沙沙. 面向三维感知的无线多媒体传感器网络覆盖增强算法[D]. 天津: 天津大学, 2015.
- [7] LI Yupeng, JI Peng, LIU Hongchao, et al. A virtual potential field based coverage-enhancing algorithm for 3D directional sensor networks[C]//Information science & service science & data mining. Taipei: IEEE, 2012.
- [8] 吴 帅, 孙力娟, 肖 甫, 等. 面向三维的无线传感器网络覆盖增强算法[J]. 计算机研究与发展, 2011, 48(z2): 106-110.
- [9] 童海燕, 蔡文郁, 刘敬彪. 基于三维传感器网络的覆盖算法的研究[J]. 杭州电子科技大学学报, 2014(1): 63-66.
- [10] 熊永华, 余双庆, 吴 敏, 等. 一种基于粒子群算法的视频传感器网络覆盖多目标优化方法[C]//第 36 届中国控制会议论文集(F). 北京: 中国自动化学会控制理论专业委员会, 2017.
- [11] 李 娜, 向凤红, 毛剑琳, 等. 多障碍场景的有向传感器网络覆盖优化算法[J]. 计算机工程, 2015, 41(4): 19-25.
- [12] 蒋 鹏, 金炜东, 秦 娜, 等. 基于粒子群优化的视频传感器网络覆盖增强算法[J]. 计算机科学, 2014, 41(4): 57-61.
- [13] PENG J, JIANG J, WU C, et al. A coverage detection and re-deployment algorithm in 3D directional sensor networks[C]//27th Chinese control and decision conference (2015 CCDC). Qingdao, China; IEEE, 2015.
- [14] 肖 甫, 王汝传, 孙力娟, 等. 一种面向三维感知的无线多媒体传感器网络覆盖增强算法[J]. 电子学报, 2012, 40(1): 167-172.
- [15] 朱海荣, 李 平, 程 剑. 基于改进 PSO 算法的 WSN 覆盖优化方法[J]. 计算机工程, 2011, 37(8): 82-84.