

8-13-2020

Precisely Algorithm and Simulation of Plurality of Random Deployed Circularity Total Coverage Area

Zhang Ye

College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;

Liu Kui

College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;

Yuzhi Chen

College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;

Junyang Liu

College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Precisely Algorithm and Simulation of Plurality of Random Deployed Circulares' Total Coverage Area

Abstract

Abstract: A precisely algorithm of total coverage area when a plurality of circulars are random deployed and overlapping with each other is needed. The key issues of the solution are the *calculating principle of the overlapping area, the differentiation and enumeration of the multi-overlapping circulars, and the calculation of the multi-shaped curved edges*. Based on the inclusion-exclusion principle, overlapping area was added or subtracted to the amount area. The computer calculation process was proposed. Because the circulars are random deployed, in order to ensure the area coverage, the area cover rate problem of repeatedly deployment of the circulars were simulated and analyzed.

Keywords

a plurality of circular, random deployed, precisely algorithm, confidence level

Authors

Zhang Ye, Liu Kui, Yuzhi Chen, Junyang Liu, and Jianchao Du

Recommended Citation

Zhang Ye, Liu Kui, Chen Yuzhi, Liu Junyang, Du Jianchao. Precisely Algorithm and Simulation of Plurality of Random Deployed Circulares' Total Coverage Area[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(12): 2896-2902.

多圆形随机分布覆盖面积的精确算法及仿真

张焯, 刘魁, 陈余植, 刘俊杨, 杜建超

(浙江工业大学机械工程学院, 杭州 310014)

摘要: 当一定区域内随机分布的多个等面积的圆形发生重叠时, 计算所有圆形构成的曲边多边形面积之和目前需要一种精确算法。算法主要解决了多圆重合面积的计算原则、多圆重合的判断和筛选、曲边多边形面积计算等技术难点, 根据容斥原理, 在总面积中根据多圆重合数的奇偶性加上或减去多圆重合面积, 同时还给出了计算机求解的详细实现流程。由于该问题圆形分布的随机性, 每次重新部署时面积覆盖率并不相同, 为了实际应用的需要, 还对多圆形随机多次部署的面积覆盖率分布问题进行了仿真分析。

关键词: 多圆形; 随机分布; 精确算法; 置信度

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2016) 12-2896-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201612003

Precisely Algorithm and Simulation of Plurality of Random Deployed Circulars' Total Coverage Area

Zhang Ye, Liu Kui, Chen Yuzhi, Liu Junyang, Du Jianchao

(College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: A precisely algorithm of total coverage area when a plurality of circulars are random deployed and overlapping with each other is needed. The key issues of the solution are the *calculating principle of the overlapping area, the differentiation and enumeration of the multi-overlapping circulars, and the calculation of the multi-shaped curved edges*. Based on the inclusion-exclusion principle, overlapping area was added or subtracted to the amount area. The computer calculation process was proposed. Because the circulars are random deployed, in order to ensure the area coverage, the area cover rate problem of repeatedly deployment of the circulars were simulated and analyzed.

Keywords: a plurality of circular; random deployed; precisely algorithm; confidence level

引言

求解多个圆形随机分布时的总覆盖面积是个看似简单, 实际具有相当难度的问题, 目前对于这个问题的相关文献较少。笔者在研究无线传感网络的覆盖效率和可靠性时^[1]碰到这个问题。在某种情

况下(比如灾害救援时), 无线传感网络的节点可能在一定区域内随机分布, 如果传感器节点的监测范围符合圆盘布尔模型^[2], 即单个节点的监测范围相当于一个半径确定的圆形区域, 整个无线传感网络的可监测面积如图 1 所示。为了获得总的监测覆盖面积大小, 需要求解多个随机分布的圆形, 已知各个圆的圆心坐标和半径后的总覆盖面积。

目前基于网格的近似算法是解决该问题的主要方法之一, 其算法是把整个区域划分为大量网格, 根据每个网格到各个圆心的距离判断该网格是



收稿日期: 2015-03-31

修回日期: 2015-06-21;

作者简介: 张焯(1973-), 男, 浙江杭州, 硕士, 副教授, 研究方向为无线传感器网络的设计和仿真; 刘魁(1991-), 男, 安徽望江, 硕士生, 研究方向为无线传感器网络的设计和仿真。

<http://www.china-simulation.com>

• 2896 •

否被任一圆形覆盖,最后汇总所有被覆盖的网格得出总覆盖面积。网格的划分有方形网格、菱形网格、六边形网格等等,目前主要运用的是菱形网格和方形网格。比如,曹峰等利用几何方法从拓扑学的角度给出了无线传感器网络目标区域的菱形网格划分方法^[3],通过将圆形部署在菱形网格的各个顶点上实现区域的完全无缝覆盖,并从理论上给出了实现完全无缝覆盖所需最少圆形个数的解析式。方形网格的算法是将基于网格的目标定位覆盖问题转化为最小化距离错误问题,设计了一种基于模拟退火算法的组合优化配置方法。

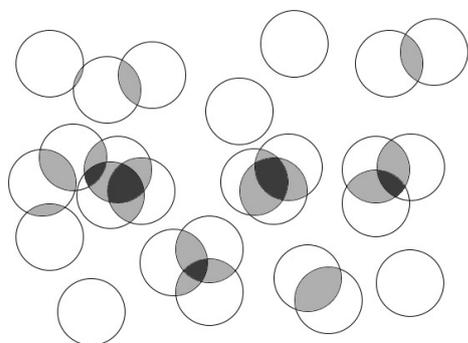


图 1 0-1 模型的无线传感器节点覆盖

M.P.Singh 等针对这个问题提出了并集的概念^[4],指出当监测区域完全被所有圆形组成的一个并集的集合包含时,该区域被完全覆盖。并且提出当单个圆形覆盖区域的边界完全被其他圆形覆盖时,该圆形与其他圆形实现无缝衔接。但是这仅仅是一个理论方案,并没有给出具体解法和步骤。

目前能找到的该问题最新的研究结果是高德民等 2011 年提出的无线传感器网络随机分布覆盖控制模型^[1],该模型研究了覆盖面积的期望值和分布概率,但没有给出具体的精确算法。

1 问题的难点

该问题看似只是面积求和的问题,但在实际求解过程中有较大难度,主要的难点在于:

1. 多圆重合面积的处理。当多圆重合时,重合部分可能出现被 2 圆、3 圆、4 圆、乃至更多圆覆盖的小块区域(如图 2 所示),要计算总覆盖面积,

首先要界定当这些小块面积被不同数量的圆形覆盖时,如何根据其圆形的重合数量确定重复面积计入总面积的计算原则。

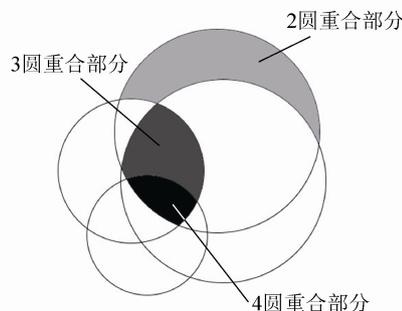


图 2 不同圆数重合形成的小块区域

2. 多圆重合的确定。在某些场景中,很有可能会出现存在大量圆形的情况,这导致这些圆形之间的重合关系错综复杂,虽然单个重合对总面积的影响几乎可以忽略,但是大量的组合组成的集合会对实际的总面积产生一定得影响,那么如何列举出所有重合圆的集合,并判断集合中组合的重合类型是较为复杂的逻辑分析问题。

3. 多圆形覆盖形成的重复曲边多边形顶点的确定。当重合的圆的数量大于 2 个时,其多圆重合部分会形成顶点数为圆重合数的曲边多边形,比如 3 圆重合时,一般情况下有 6 个交点,其中 3 个交点形成 3 圆重合的曲边多边形,必须确定该曲边多边形的顶点,然后才能计算该曲边多边形的面积。

4. 多圆重合形成曲边多边形面积的计算。曲边多边形可以分成顶点构成的多边形和剩余的弓形面积之和,曲边多边形面积的计算,虽然理论上根据其顶点的坐标进行计算比较简单,但计算机求解时,这 2 部分面积的计算均要求区分出顶点的顺时针或逆时针分布顺序,划分其顶点顺序的逻辑也较为复杂。

2 解决方案

2.1 重合面积的计算原则—容斥原理

在考虑多圆重合的小块面积与总面积的关系时,可以应用容斥原理^[5]界定其计算原则,即对小

块计数时, 必须注意无一重复, 无一遗漏。为了使重叠部分不被重复计算, 先不考虑重叠的情况, 把包含于某内容中的所有对象的数目先计算出来, 然后再把计数时重复计算的数目排斥出去, 使得计算的结果既无遗漏又无重复。

设多圆重合的总面积 S 为有限集, A 为单个圆的面积, A_i 为第 i 个圆, 其中:

$$A_i \subseteq S (i=1, 2, \dots, n, n \geq 2) \quad (1)$$

则容斥原理的数学表达式:

$$\left| \bigcup_{i=1}^n A_i \right| = \sum_{k=1}^n (-1)^{k-1} \sum_{1 \leq i_1 < i_2 < \dots < i_k \leq n} |A_{i_1} \cap A_{i_2} \cap \dots \cap A_{i_k}| \quad (2)$$

也可以表示为:

$$\begin{aligned} & |A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_m| = \\ & \sum_{1 < i < m} |A_i| - \sum_{1 < i < j < m} |A_i \cap A_j| + \\ & \sum_{1 < i < j < k < m} |A_i \cap A_j \cap A_k| - \\ & \dots (-1)^{m-1} |A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_m| \end{aligned} \quad (3)$$

对于多圆重合总面积计算的问题, 容斥原理的计算思路可以理解为, 先计算出所有圆面积之和, 由于本文事先约定所有的圆面积大小相等, 则总面积之和就是圆的数量乘以单个圆的面积, 然后减去所有 2 圆重合部分的面积, 再加上所有 3 圆重合部分的面积, 再减去 4 圆重合部分的面积, 并以此类推, 最后算出覆盖总面积。

2.2 多圆重合的判定与列举

对于大量随机分布的圆形, 要实现上述算法, 必须列举出所有可能的多圆重合的集合, 如果要对所有的圆的组合进行是否重合的判断, 其计算量将大得惊人, 因此我们按照以下流程来大幅度减少计算量。

1. 引入第 i 个圆 A_i , 设 x, y 为圆心坐标, r 为圆半径, 则可列举出所有与此圆有重合关系的所有圆的集合 S , 即当 $j < i$ 时, 如果:

$$\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} < r_i + r_j \quad (4)$$

则: $A_j \in S$, 且 $A_i \in S$

2. 列出集合 S 的所有子集 S_i , 如果满足:

$$(1) A_i \in S_i$$

$$(2) S_i \text{ 中任一圆均和其他圆相交}$$

则将 S_i 加入有效多圆重合的集合 S' 。

3. 重复第 1 步直至引入所有圆。此时我们便获得所有多圆重合的集合 S' 。

对于判断若干个圆是否重合, 以及重合圆的数量, 需要一种便于计算机判断是否存在多圆重合、重合圆的数量的方法, 本文给出了以下的逻辑规则, 在这个场合简便而有效:

1. 第 i 个圆形与某一圆形的任一交点, 如果同时存在于其他 n 个圆形的内部, 则存在一个包括圆形 i 在内的, 由 $n+2$ 个圆形组成的多圆重合的组合。

2. 除第 i 个圆形外的任意 2 个圆的交点, 同时存在于包括圆形 i 的其他 n 个圆形的内部, 则存在一个包括圆 i 在内的, 由 $n+2$ 个圆形组成的多圆重合的组合。

2.3 多圆重合形成的曲边多边形顶点的确定

多圆重合时, 会形成边数小于等于重合圆数的曲边多边形, 如图 3 所示。多圆相交会有很多的交点, 要计算曲边多边形的面积, 首先要确定哪些交点是曲边多边形的顶点。

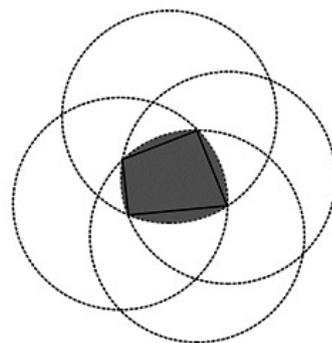


图 3 多圆重合组成的曲边多边形

本文给出的判定任意二圆的交点是否是曲边多边形顶点的依据是: 当该交点被其他 $m-2$ 个圆覆盖, 则说明这个交点是这 m 个圆相交形成的曲边多边形的一个顶点。

为了计算便于进一步计算曲边多边形面积, 我们还必须将曲边多边形的顶点按顺时针或逆时针

方向排序^[6]。其方法是, 先找出 x 轴方向最高和最低的顶点, 然后连接这两个点把所有的顶点分为左右两部分; 紧接着对右边的各顶点的 y 坐标采用冒泡法进行从上到下排序, 同样的办法对左边的顶点进行从下到上的排序; 最后可以使所有的顶点按逆时针进行连接, 构成一个多边形。

2.4 多圆重合形成的曲边多边形的面积计算

由多圆重合形成的曲边多边形为凸曲边多边形, 并且曲边多边形的边都为其中某一个圆形的一条弦, 同时每一条弦又对应一段圆弧, 因此可以将曲边多边形面积计算分解为以曲边多边形顶点连接而成的不规则多边形面积的计算和多个弓形面积的计算问题。

由于多边形的顶点已经按照逆时针进行排序, 多边形的计算可参考罗志强等提出的方法^[6], 由推广的 Green 公式建立起重积分与曲线积分的关系, 推导出任意多边形的面积计算公式:

$$S_R = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m (x_k y_{k+1} - x_{k+1} y_k) \quad (5)$$

式中: S_R 为多边形的面积; m 为多边形的顶点数量; x_k 为多边形某一顶点的横坐标; y_k 为多边形某一顶点的纵坐标。

弓形面积则由该段圆弧构成的扇形面积减去由圆心和 2 个顶点构成的三角形面积即可, 由于本文中所有圆形的大小完全相等, 则只要弦长确定, 弓形的面积就确定了。

其计算公式为:

$$S = R^2 \cdot \sin^{-1} \left(\frac{L}{2R} \right) - \frac{L}{2} \sqrt{R^2 - \frac{L^2}{4}} \quad (6)$$

式中: S 为弓形的面积; R 为圆的半径长度; L 为圆弧对应的弦长。

3 计算机求解的流程及算法效率比较

3.1 计算机求解的流程

设总覆盖面积为 Z , 第 i 个圆形为 A_i , 则该算法在计算机上求解的流程如下:

1. 获得到 A_i 的圆心坐标, $i=1 \sim n$, 在总覆盖面积 Z 上加上一个圆形的面积。
2. 判断该圆形与 $A_1 \sim A_{i-1}$ 是否相交, 列出所有与该圆相交的所有圆的组合, 然后在覆盖面积 Z 中减去所有二圆重合的重合部分面积。
3. 判断这些圆的最大多圆重合数 m 。
4. 列出所有可能的 $3 \sim m$ 个多圆组合关系。
5. 判断这些多圆组合的每一项, 是否的确存在全部重合关系, 如果不存在, 则去除这一组合。
6. 计算每一项多圆重合的重合部分的面积。首先确定重复部分的顶点, 然后计算顶点构成的多边形面积, 最后计算弓形面积。
7. 在总面积 Z 中加上或减去多圆重合部分面积。
8. 重复 1~7 过程, 直至 $i=n$ 。

3.2 算法效率比较

目前能够检索到的计算出某一具体多圆法分布的覆盖面积的算法仅有网格算法, 为了分析本文算法的效率和优势, 我们将本文算法和基本网格算法的计算效率和优劣进行了比较。

网格算法首先是一种近似算法, 其计算精度取决于网格的密度, 而且其计算量将随着其精确度的提高急速增加。计算时需要对每一个网格是否被某一圆形覆盖进行计算, 如果不考虑模拟退火优化等优化方法, 判断每一个网格是否被覆盖需要进行的浮点运算次数为:

$$S = gnl \quad (7)$$

式中: g 为网格数; n 为节点数; 1 为一次距离判断的浮点计算次数, 包括 3 次加减法, 2 次平方和 1 次开根号计算。

为了分析 2 种算法在不同精度下的计算效率, 我们采用普通 PC 机对一定面积下(150 单位 \times 100 单位)二种算法的计算效率进行了统计分析, 其中统计了使用不同精度网格法的计算时间, 以及本文算法的计算时间, 其统计结果如图 4 所示。

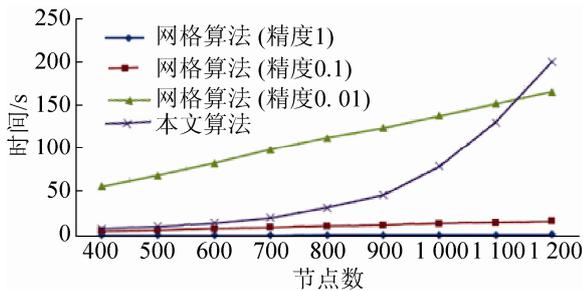


图 4 不同精度的网格算法及本文算法的实际计算时间

从图中可以看出, 网格算法适用于面积不大, 计算精度极低的情况下, 当计算精度略微提高时, 计算时间会快速增加, 其计算量和精度均不太适合应用于对于实际问题的仿真计算。

本文算法为一种精确算法, 计算结果可以始终保持双精度浮点数, 当节点密度不大时, 计算速度很快, 当节点密度较高时, 多圆重合数较多时, 在上述计算机流程第 4 步会出现较多的递归次数, 会增加较多的计算量, 但考虑到其精度很高, 可以事先对不同面积和节点密度的情况进行仿真, 然后拟合出经验公式, 以方便实际应用。

4 多圆形多次随机部署面积覆盖率分布仿真

由于多圆形随机分布具有一定的随机性, 因此当区域面积确定、圆形数量和直径不变的情况下, 每次重新部署形成的多圆重合的面积覆盖率也不同。在某些情况下, 为了确保每一次部署都能够能保证一定的覆盖率, 需要对圆形数量、面积覆盖率与达到某一覆盖率的置信水平建立起一定的对应关系, 以便于对部署的数量和密度事先进行决策。

为了分析上述关系, 我们对一定区域内一定数量的圆形多次随机分布产生的覆盖面积数值进行了仿真。比如, 当区域面积为 150 单位 \times 100 单位, 圆形的覆盖半径为 3 单位, 部署 800 个圆形时, 进行 10 000 次仿真计算后其覆盖面积的分布情况如图 5 所示:

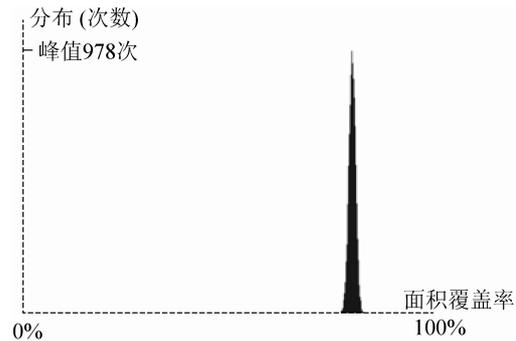


图 5 10 000 次仿真后面积覆盖率的分布情况

面积覆盖率最大值是 78.03%, 最小值是 73.78%, 平均值为 75.91%, 极差是 4.23%, 接近于 1/20。

为了形象地表示一定区域内不同数量的圆形随机部署时的面积覆盖率的变化, 我们对同一区域从部署 0 个圆形开始, 以 50 个圆形作为跨度, 逐步增加圆形直至 1 000 个, 然后对每种情况分别作了 10 000 次仿真, 然后取仿真结果的平均值, 可以得到不同数量圆形部署在该区域时面积覆盖率的变化情况, 如图 6 所示。

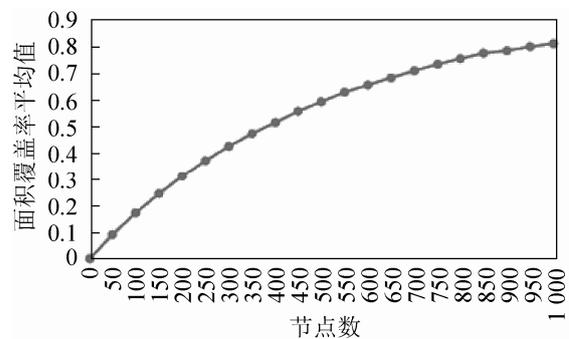


图 6 不同数量的圆形随机部署覆盖率的平均值

这样, 对于特定区域和覆盖半径为特定值的圆形, 就可以通过仿真获得其部署数量和面积覆盖率之间的大致关系。可以预先判断当部署一定数量的圆形的面积覆盖情况, 或者当需要达到一定的面积覆盖效果时, 大致需要多少圆形。

5 置信度分析和经验公式

为了事先快速计算部署多少个圆形能够有较大的概率获得满意的面积覆盖率, 我们引入置信

水平 $\beta^{[7]}$, 分析圆形数量、部署后面积覆盖率与其置信度之间的关系, 当要求置信水平大于等于 β 时, 其面积覆盖率应有临界值 η , 面积覆盖率低于 η 的概率较大, 能满足置信水平 β 。反之, 面积覆盖率高于 η 的概率较小, 不能满足置信水平 β 。

假设在边长分布为 a, b 的区域内, 部署 n 个覆盖半径为 r 的圆形, 则面积覆盖率临界值 η 与置信水平 β 之间有一定的对应关系, 可表示为:

$$\text{interval}(\eta, (n\pi r^2) / ab) = \text{interval}(f(n, \beta), (n\pi r^2) / ab) \quad (8)$$

假设某一区域尺寸为 150 单位 \times 100 单位, 圆形半径为 3 单位, 在置信度公式 $(1-a/2)\%$ 中, a 分别选取 1~0, 即置信水平取 0.5~1 时, 不同圆形的面积覆盖率临界值经仿真计算, 结果如图 7 所示。

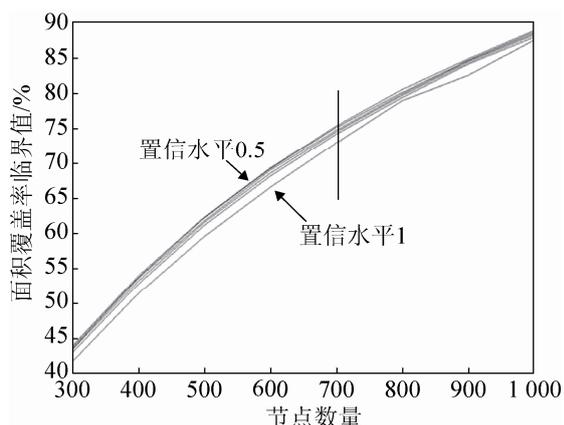


图 7 不同置信区间面积覆盖率临界值与圆形数的关系

图 7 可以看出, 对于同一区域, 当部署一定数量的圆形时, 面积覆盖率和置信度水平呈反比。而如果需要确保某一面积覆盖率的置信度水平, 则需要部署更多的圆形。

这正代表了实际应用中, 设备数量和覆盖效果约束的二种情况。当确定圆形数量, 需要评估覆盖率和其置信度时, 可以在视为图 7 中画出 x 等于圆形数的垂直线(如图所示), 垂直线和不同置信度曲线的交点即为不同置信度时的覆盖率。当对置信度和覆盖率有确定的要求, 需要确定部署圆形的数量时, 可以在图 7 中画出 y 等于覆盖率的水平线, 该线与不同置信度曲线的交点即为不同置信度要求

时应部署的圆形数量。

为了便于快速计算, 可以拟合出一定区域内 a, b, r 为定值时, 面积覆盖率临界值 η 随圆形数量 n 与置信水平 β 的经验公式。

当 $n \in (300, 1000)$ 时, 设面积覆盖率 η 随圆形数量 n 变化的关系式为:

$$\eta = f(n) = k \cdot n + b, \quad n \in (300, 1000) \quad (9)$$

求得回归模型拟合系数表后发现, a 变化很小可近似看成一个定值, 而 b 值跟呈现出一定的递减关系, 可进行多项式拟合:

$$b = g(\beta) = c_n \cdot n^n + c_{n-1} n^{n-1} + \dots + d, \quad \beta \in (0.5, 1) \quad (10)$$

可得此情境($a, b, r, n \in (300, 1000)$)时的 2 个经验公式:

$$\eta = f(n, \beta) = 0.063n - 16.1\beta^2 + 18.7\beta + 23 \quad (11)$$

$$n = \left(\frac{1000(16.1\beta^2 - 18.7\beta - 23 + \eta)}{63} \right) \quad (12)$$

经验算, 该经验公式的相对误差值很小, 均在 5% 之内, 说明这个经验公式具有较高的应用指导价值。

6 结论

本文提出的算法能够做到精确计算相同圆相交而形成的曲边多边形面积, 并且流程相对简单, 计算量小, 可以快速得到大面积、多圆形情况下的计算结果, 是一种具有较高实用价值的算法。另外, 本文提出的仿真结果和经验公式为类似情况的决策提供了有效的工具。

本算法尚存在不足, 需进一步完善以下方面:

1. 当一定区域内圆的密度较大时, 流程后期多圆组合的最大数 m 较大时, 列出所有组合的过程递归数量较多, 会占用一定的计算资源, 计算速度会有所减慢。

2. 该算法未考虑区域边界处理的问题, 如果需要计算在一定区域(如矩形)内的覆盖面积, 当临近边界的圆有部分落在区域外时, 需要对算法进行调整, 在计算每一块重合面积时均应考虑区域外部分面积的去。

参考文献:

- [1] 高德民, 钱焕延, 徐江, 等. 无线传感器网络随机分布模型及覆盖控制研究 [J]. 传感技术学报, 2011, 24(3): 412-413. (Gao Demin, Qian Huanyan, Xu Jiang, et al. Wireless Sensor Network Random Distribution Model and Coverage Control Research [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2011, 24(3): 412-413.)
- [2] 李晓卉, 方康玲, 何坚. 一种改进的室内 wsn 仿真模型 [J]. 计算机仿真, 2012, 29(5): 136-222. (Li Xiaohui, Fang Kang Ling, He Jian. Improved Indoor Wireless Sensor Networks Simulation Model [J]. Computer Simulation, 2012, 29(5): 136-222.)
- [3] 曹峰, 刘丽萍, 王智. 能量有效的无线传感器网络部署 [J]. 信息与控制, 2006, 35(2): 147-153. (Cao Feng, Liu Liping, Wang Zhi. A New Energy-efficient WSN Deployment Algorithm [J]. Information and Control, 2006, 35(2): 147-153.)
- [4] M P Singh, M M Gore. A Solution to Sensor Network Coverage Problem [C]// Personal Wireless Communications, ICPWC 2005. 2005 IEEE International Conference on, Oakland. USA: IEEE Computer Press, 2005: 77-80.
- [5] 唐善刚. 容斥原理的拓展及其应用 [J]. 山东大学学报, 2011, 46(12): 70-75. (Tang Shangang. A generalization of the principle of inclusion-exclusion and its application [J]. Journal of Shandong University, 2011, 46(12): 70-75.)
- [6] 罗志强, 钟尔杰. 任意多边形面积公式的推导及其应用 [J]. 大学数学, 2005, 21(1): 123-125. (Luo Zhi Qiang, Zhong Erjie. Derivation of Formula for Any Polygonal Area and Its Applications [J]. College Mathematics, 2005, 21(1): 123-125.)
- [7] 柳世考, 刘兴堂, 张文. 利用相似度对仿真系统可信度进行定量评估 [J]. 系统仿真学报, 2002, 14(2): 143-145. (Liu Shikao, Liu Xingtang, Zhang Wen. Fixed Quantity Evaluation to Reliability of Simulation System with Similar Degree [J]. Journal of System Simulation (Acta Simulata Systematica Sinica) (S1004-731X), 2002, 14(2): 143-145.)
-
- (上接第 2895 页)
- [14] 高春能, 张彪, 纪志成. 基于自适应动态搜索粒子群的 SWM 参数优化研究 [J]. 系统仿真学报, 2015, 27(12): 2958-2965. (Gao Chunmeng, Zhang Biao, Ji Zhicheng. Study of Adaptive Dynamic Search PSO Based SVM Parameter Optimization [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2015, 27(12): 2958-2965.)
- [15] Xuewen Xia, Jingnan Liu, Zhongbo Hu. An Improved Particle Swarm Optimizer Based on Tabu Detecting and Local Learning Strategy in a Shrunk Search Space [J]. Applied Soft Computing (S1568-4946), 2014, 23(23): 76-90.
- [16] 田娜, 纪志成. 带扰动算子的量子粒子群在水污染源识别中的应用 [J]. 系统仿真学报, 2015, 27(7): 1628-1637. (Tian Na, Ji Zhicheng. Estimation of Contamination Source by Using QPSO with Perturbation Operator [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2015, 27(7): 1628-1637.)
- [17] 傅军栋, 邹欢, 康水华. PSO-SWM 算法在智能建筑环境监测系统中的应用 [J]. 华东交通大学学报, 2016, 33(1): 121-127.
- [18] Changhe Li, Shengxiang Yang, Trung Thanh Nguyen. A self-learning particle swarm optimizer for global optimization problems [J]. IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics -- Part B: Cybernetics (S1083-4419), 2012, 42(3): 627-646.
- [19] Das S, Suganthan P N. Problem definitions and evaluation criteria for CEC 2011 competition on testing evolutionary algorithms on real world optimization problems [R]. Technical report. Kolkata, India: Jadavpur University, 2010.