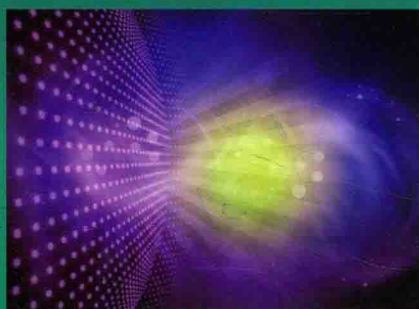


# 传感器网络的拓扑特征 提取方法及应用

蒋洪波 刘文平 编著



科学出版社

# 传感器网络的拓扑特征 提取方法及应用

蒋洪波 刘文平 编著

科学出版社

北 京

## 版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303

### 内 容 简 介

无线传感器网络是当今世界备受瞩目、具有高度学科交叉性和知识集成性的研究热点,在军事国防、工农业控制、环境检测和抢险救灾等领域已有成功应用。复杂的网络拓扑特征给传感器网络的应用带来巨大挑战,深刻地影响着网络的性能和使用寿命。利用网络拓扑特征来设计高性能网络协议是传感器网络研究中的重要内容。本书着重介绍了近年来在传感器网络的边界识别、骨架提取和网络分解这三大拓扑特征提取方面的研究成果,并介绍其在网络路由、定位、数据存储等方面的应用。

本书可供高等院校计算机网络相关专业高年级本科生、研究生、教师和相关科研人员使用。

#### 图书在版编目(CIP)数据

传感器网络的拓扑特征提取方法及应用/蒋洪波,刘文平编著. —北京:科学出版社, 2015. 11

ISBN 978-7-03-046282-4

I. ①传… II. ①蒋… ②刘… III. ①传感器—网络—拓扑结构—特征—研究 IV. ①TP212 ②TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 267969 号

责任编辑:张颖兵 黄彩霞 / 责任校对:肖 婷

责任印制:彭 超 / 封面设计:苏 波

**科 学 出 版 社** 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

湖北卓冠印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

开本:787×1092 1/16

2016 年 4 月第 一 版 印张:11 3/4

2016 年 4 月第一次印刷 字数:279 000

定价:60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 序

物联网是近年来备受世界瞩目的信息技术之一,是当前世界新一轮经济和科技发展的一个战略制高点。作为物联网的基本组成部分,传感器网络是物联网各项功能得以实现的重要保障。它是传感器技术、嵌入式计算技术、计算机网络和无线通信技术等重要信息技术的集大成者,因其低功耗、低成本、分布式和自组织的特点,已被广泛应用于战场监视、灾难营救、栖息地监测等领域。传感器网络带来了信息感知的一场变革,被评为“21世纪最有影响力的技术”之一。

和一般 Ad Hoc 网络相比,传感器网络数量巨大、拓扑结构易变,且在能量、计算和存储能力等方面受到诸多限制,因此传感器网络研究的首要目标,是如何有效降低能耗、延长网络生命周期,从而实现网络效用最大化。实现此目标的途径有很多,如调节传感器节点的工作周期、为传感器节点定时补充能量等;但一个更有效的办法是,充分利用网络的拓扑结构来实现网络协议的设计。例如,要实现源节点与目标节点之间的路由,传统的基于地理位置的贪婪路由算法以最短路由路径为目标,在复杂网络中易出现边界节点的过载现象,导致这些边界节点因能量耗尽而失效,或是在边界上产生局部极小值而无法成功地实现路由。出现这些问题的根源,就在于网络路由路径与网络真实拓扑结构之间的不匹配。如果我们可以利用网络的拓扑特征来设计路由协议,就可以有效地解决这些问题。

目前,在传感器网络学术界,关于网络拓扑特征提取的研究主要分为三大块:边界识别、骨架提取和网络分解。事实上,在计算机视觉和计算机图形学等科学领域,关于物体拓扑特征提取及应用的研究成果已十分丰富。但是,这些领域中已有的拓扑特征提取方法,无法直接应用于传感器网络中,这主要是由传感器网络的资源有限性、位置难以获得等自身特点所决定的。可以说,传感器网络中的拓扑特征提取,仍然面临诸多挑战,这也是近十年来传感器网络的一个重要研究方向,在 IEEE INFOCOM, ACM MOBIHOC, IEEE TPDS, ACM/IEEE TON 等国际重要会议和期刊上屡见相关成果。

由华中科技大学蒋洪波教授和刘文平博士编写的《传感器网络的拓扑特征提取方法及应用》,是我所看到的第一本全面深入介绍在二维/三维传感器网络中常用拓扑特征提取的方法及其应用的书籍。作者在传感器网络的拓扑特征提取领域潜心研究近十载,做出了大量富有成果的研究,在相关国际学术会议和期刊上发表过数十篇学术论文,填补了国内学者在该领域的研究空白。本书作者所取得的成果处于该领域的国际领先水平,在国内外具有相当的知名度和影响力,相信本书一定会给读者带来裨益。

本书内容详尽完整,涵盖了近年来作者及国际学者们在传感器网络拓扑特征提取与应用方面的重要研究成果。全书共分为三篇:第一篇,介绍二维/三维传感器网络及其拓扑特征提取的概念及研究意义,列举了传感器网络的体系结构、应用场景与通信模型等,为后文陈述铺陈;第二篇,分门别类地介绍二维/三维传感器网络中的边界识别、骨架提取与网络分解的方法,介绍网络分解时,侧重于网络形状分解而非基于事件的网络分解,十分符合本书的编写宗旨;第三篇,着眼于网络路由和定位在传感器网络研究中的基础地位,重点介绍了网络边界、骨架和形状分解三大拓扑特征分别在网络路由和定位协议设计

中的应用,有利于读者快速、全面理解各种拓扑特征在传感器网络中的具体作用,该篇末尾辅以介绍了拓扑特征在数据存储和网络导航等方面的应用。全书思路清晰、结构合理、重点突出,是一本极具参考价值的专业书籍。

当然,传感器网络拓扑特征提取还有很多潜在应用价值。例如,可以利用拓扑特征来改善网络覆盖度、为传感器网络节点充电或数据搜集进行路径规划等,这或许可以成为有兴趣的读者们的研究方向。

兹为序!

王新兵

2015年10月于上海交通大学

## 前言

中华人民共和国工业和信息化部《物联网“十二五”发展规划》中提出了我国当前的主要任务是大力攻克核心技术,加快构建标准体系,协调推进产业发展以及着力培育骨干企业等,这表明我国拟加快培育和壮大物联网的步伐,以抢占新一轮科技和经济发展的战略制高点。作为物联网的重要组成部分,无线传感器网络是当今世界备受瞩目、具有高度学科交叉性和知识集成性的研究热点,为人们获取信息提供了新的途径,通过网络传输将客观真实的物理信息传递给用户,从而建立起连接物理世界和信息世界的桥梁。其优点在于,无须固定设备支撑、易于组网和方便部署,具有十分广阔的应用前景,是物联网各项功能得以实现的重要保障。然而,传感器网络中一个突出的问题是每个传感器节点的能量通常是有限且不可补给的。如何有效使用节点能量,以保证监测任务顺利完成,是传感器网络研究中一个十分重要的研究问题。

目前,国内外关于传感器网络研究方面的书籍很多,但是真正涉及传感器网络的拓扑特征提取的却罕有所见。本书首次全面、详尽地介绍了当前在二维/三维传感器网络拓扑特征提取方面的主要方法及其应用。在介绍方法或应用过程中,在不影响读者理解的前提下,尽量侧重于总体思想和基本步骤,而不过多讨论具体细节,但给出了详细的参考文献供读者查阅。通过这种组织安排,读者很快就能顺利理清本书的写作脉络,掌握拓扑特征提取的重要性和应用前景。

本书共分三篇。全书主要内容及组织结构如下:

第一篇传感器网络及拓扑特征。其中,第1章主要介绍传感器网络的体系结构、分类和通信模型;第2章详细介绍传感器网络中的拓扑特征(包括网络边界、骨架和形状分解)的概念及其意义。

第二篇传感器网络中的拓扑特征提取方法。其中,第3章介绍传感器网络的边界识别方法,首先分别介绍二维传感器网络中基于地理位置的方法、基于统计的方法、基于局部邻域的方法、基于全局拓扑的方法和基于图论的方法,接着介绍三维传感器网络的边界识别方法;第4章首先介绍二维传感器网络的骨架提取方法,并依据其对边界信息的依赖程度分别进行介绍,接着介绍三维传感器网络中的线骨架和面骨架的提取方法;第5章介绍传感器网络的分解算法,根据二维传感器网络的分解结果,我们将其分为网络(近似)凸分解算法和一般分解算法,并进行逐一介绍,接着介绍三维传感器网络中的形状分解方法。

第三篇拓扑特征在传感器网络中的重要应用。其中,第6章介绍拓扑特征在网络路由协议设计方面的应用,基于位置信息的贪婪路由算法在形状简单的网络中性能十分卓越,但在复杂网络中却易受局部极小值困扰而无法保证路由成功率,这是因为贪婪路由算法没有充分考虑到网络的具体拓扑特征,导致网络连通图与基于实际位置的路由路径之间出现了不匹配现象。然而,由于贪婪路由算法简单、有效等特点且具备良好可扩展性,已有文献主要围绕如何逃离局部极小值,或者通过建立虚拟坐标来尽量避免出现局部极小值来进行算法设计。我们根据这些算法所使用的拓扑特征,对基



于边界信息的路由算法、基于骨架信息的路由算法和基于网络分解的路由算法进行逐一介绍。第7章介绍拓扑特征在网络定位方面的应用,传感器节点位置是传感器网络应用中必不可少的信息,但基于GPS的节点定位成本高而无法大规模使用,一般的做法是基于节点间的连接关系来建立虚拟坐标,并利用一些位置已知的信标节点将这些虚拟坐标转化为绝对坐标。同样,许多定位算法(如基于多维标度法的MDS-MAP算法)在简单网络中性能出色,但在复杂网络中由于凹点的存在,其性能大大降低。因此,充分利用网络拓扑特征,可以显著提高定位精度。第8章介绍拓扑特征在数据存储和导航等方面的应用。

本书第1~3章和第8章由蒋洪波编写,第4~7章由刘文平编写。在全书的编写过程中,王琛博士、杨洋博士和刘庭薇、魏巍等同学提供了很多帮助,在此表示感谢!本书在国家自然科学基金青年项目“二维/三维无线传感器网络的骨架提取与应用研究”(编号:61202460)、国家自然科学基金面上项目“高亏格三维曲面传感器网络中基于负载均衡的弹性几何路由协议研究”(编号:61572219)、国家自然科学基金面上项目“基于网络分割的三维传感器网络可扩展几何路由技术研究”(编号:61271226)、教育部新世纪优秀人才计划(编号:NCET-10-408)和中国博士后科学基金面上项目“三维传感器网络的Reeb图构建及其应用”(编号:2014M552044)的资助下得以出版。

由于作者水平有限,书中难免有不足之处,欢迎读者批评指正。

蒋洪波 刘文平  
2015年9月8日

# 目 录

## 第一篇 传感器网络及拓扑特征

|                    |    |
|--------------------|----|
| 第 1 章 绪论           | 3  |
| 1.1 传感器网络的体系结构     | 3  |
| 1.2 传感器网络的分类       | 4  |
| 1.3 传感器网络的通信模型     | 6  |
| 参考文献               | 6  |
| 第 2 章 传感器网络的拓扑特征提取 | 8  |
| 2.1 拓扑特征提取的意义      | 8  |
| 2.2 传感器网络的主要拓扑特征   | 9  |
| 2.2.1 网络边界         | 9  |
| 2.2.2 网络骨架         | 11 |
| 2.2.3 网络分解         | 13 |
| 2.3 拓扑特征提取的挑战      | 13 |
| 参考文献               | 13 |

## 第二篇 传感器网络的拓扑特征提取方法

|                      |    |
|----------------------|----|
| 第 3 章 网络边界识别         | 17 |
| 3.1 网络边界             | 17 |
| 3.2 二维传感器网络基于地理位置的方法 | 18 |
| 3.3 二维传感器网络基于统计的方法   | 21 |
| 3.3.1 中心度法           | 21 |
| 3.3.2 邻居个数法          | 23 |
| 3.4 二维传感器网络基于局部邻域的方法 | 23 |
| 3.5 二维传感器网络基于全局拓扑的方法 | 24 |
| 3.5.1 等距离线法          | 25 |
| 3.5.2 边界路径同伦法        | 25 |
| 3.6 二维传感器网络基于图论的方法   | 26 |
| 3.6.1 同调论法           | 27 |
| 3.6.2 FGP 变换法        | 27 |



3.7 三维传感器网络的边界识别..... 30

3.7.1 UBF 算法 ..... 30

3.7.2 CABET 算法 ..... 35

3.7.3 Coconut 算法 ..... 40

参考文献 ..... 44

**第 4 章 传感器网络的骨架提取 ..... 47**

4.1 基于完全边界的 MAP 算法 ..... 47

4.2 CASE 算法 ..... 50

4.2.1 理论基础..... 50

4.2.2 CASE 算法 ..... 52

4.3 基于距离变换的骨架提取..... 54

4.3.1 距离变换..... 55

4.3.2 基于距离变换的骨架定义..... 56

4.3.3 DIST 算法 ..... 57

4.4 无边界信息的骨架提取..... 61

4.4.1 CENT 算法理论基础 ..... 61

4.4.2 CENT 算法 ..... 64

4.4.3 扩张算法理论基础..... 66

4.4.4 扩张算法..... 68

4.5 三维传感器网络的线骨架提取..... 69

4.5.1 理论基础..... 71

4.5.2 传感器网络的线骨架提取通用算法..... 74

4.6 三维传感器网络的面骨架提取..... 78

4.6.1 理论基础..... 79

4.6.2 面骨架提取算法..... 81

参考文献 ..... 82

**第 5 章 网络分解 ..... 88**

5.1 近似凸分解 ACD 算法 ..... 88

5.1.1 凹/凸点识别与边界分割 ..... 89

5.1.2 网络近似凸分解..... 90

5.2 CONVEX 凸分解算法 ..... 93

5.2.1 识别关键点..... 93

5.2.2 角平分线构建..... 94

5.2.3 分割识别..... 95

5.3 CONSEL 分割算法 ..... 97

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 5.3.1 相关理论知识介绍       | 97  |
| 5.3.2 CONSEL 分割算法设计  | 99  |
| 5.4 一般分解算法           | 102 |
| 5.4.1 边界监测           | 102 |
| 5.4.2 构造距离场          | 102 |
| 5.4.3 计算流指针          | 103 |
| 5.4.4 合并邻近汇聚节点       | 104 |
| 5.4.5 分割形成           | 104 |
| 5.4.6 最后清除           | 105 |
| 5.5 三维传感器网络的瓶颈识别分割算法 | 105 |
| 5.5.1 计算内射半径         | 105 |
| 5.5.2 基于内射半径的形状分割    | 107 |
| 参考文献                 | 108 |

### 第三篇 拓扑特征在传感器网络中的应用

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 第 6 章 拓扑特征在网络路由方面的应用        | 113 |
| 6.1 基于边界信息的路由算法             | 114 |
| 6.1.1 GPSR 路由算法             | 114 |
| 6.1.2 NoGeo 路由算法            | 115 |
| 6.1.3 基于里奇流的路由算法            | 117 |
| 6.1.4 三维传感器网络中的 VHM 路由算法    | 120 |
| 6.1.5 三维传感器网络中的 Bubble 路由算法 | 123 |
| 6.2 基于骨架信息的路由算法             | 126 |
| 6.2.1 二维传感器网络中基于骨架的路由算法     | 126 |
| 6.2.2 三维传感器网络中基于线骨架的路由算法    | 130 |
| 6.3 基于网络分解的路由算法             | 131 |
| 6.3.1 GLIDER 路由算法           | 131 |
| 6.3.2 CONVEX 路由算法           | 133 |
| 参考文献                        | 134 |
| 第 7 章 拓扑特征在网络定位方面的应用        | 136 |
| 7.1 利用边界信息的定位算法             | 136 |
| 7.1.1 REP 定位算法的理论基础         | 137 |
| 7.1.2 REP 定位算法              | 138 |
| 7.2 利用骨架信息的定位算法             | 140 |
| 7.2.1 DC 定位理论基础             | 140 |

7.2.2 DC 定位算法 ..... 142

7.3 基于凸分解的定位算法 ..... 144

7.3.1 MDS 定位算法 ..... 144

7.3.2 ACDL 定位算法 ..... 145

7.4 基于质心的定位算法 ..... 147

7.4.1 质心定位算法 ..... 147

7.4.2 APIT 算法 ..... 148

7.4.3 凸规划定位算法 ..... 149

7.5 基于凹点识别的 CATL 算法 ..... 151

7.5.1 网络辅助结构 ..... 152

7.5.2 探测凹点 ..... 153

7.5.3 定位 ..... 154

参考文献..... 156

第 8 章 拓扑特征在数据存储与导航方面的应用..... 159

8.1 基于边界信息的事件监测 ..... 159

8.1.1 事件监测 ..... 159

8.1.2 事件边界检测 ..... 160

8.1.3 存在的问题 ..... 162

8.2 数据存储与查询 ..... 162

8.2.1 数据存储机制 ..... 162

8.2.2 典型的分布式数据存储与查询机制 ..... 163

8.2.3 基于网络拓扑特征的数据存储与查询 ..... 167

8.3 基于骨架的安全导航 ..... 169

8.3.1 移动机器人的路径导航 ..... 169

8.3.2 无线传感器网络的路径导航 ..... 171

8.3.3 基于骨架的安全导航及路径规划 ..... 172

参考文献..... 174

# 第一篇 传感器网络及拓扑特征



# 第1章 绪论

## 1.1 传感器网络的体系结构

无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)是当今世界备受瞩目、具有高度学科交叉性和知识集成性的研究热点。推动其产生和发展的主要原因是微传感器、微处理器等硬件的小型化,以及现代网络和无线通信等技术的进步。无线传感器网络为人们获取信息提供了新的途径,通过网络传输将客观真实的物理信息传递给用户,建立起连接物理世界和信息世界的桥梁。其优点在于,不需要固定设备支撑,易于组网和方便部署,特别适用于无人监管区域的监测任务,在军事国防、工农业控制、城市管理、生物医疗、环境监测、抢险救灾、危险区域远程控制等领域,尤其是在环境监测<sup>[1]</sup>、战场监视<sup>[2]</sup>和灾难营救<sup>[3]</sup>等方面应用前景广阔。《美国商业周刊》<sup>[4]</sup>评价它是21世纪最有影响力的21项技术之一,《MIT技术评论》<sup>[5]</sup>认为它是改变世界的十大技术之一。

无线传感器网络由部署在监测区域(sensing field)内大量的廉价微型传感器节点(sensor node or mote)组成,每个节点都具有一定的感知、计算和存储能力,这些节点通过相互通信、协作感知,形成多跳自组织网络系统。每个节点将感知信息通过多跳方式传输至汇聚节点(sink),经过简单的分析处理后,利用网络和卫星将感知信息传递给终端用户,如图1.1所示。传感器节点、感知对象和用户构成了无线传感器网络的三要素。

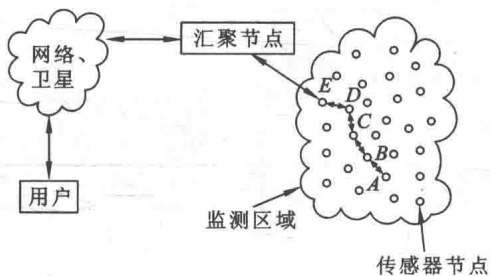


图 1.1 无线传感器网络的体系结构

与一般 Ad hoc 网络相比,WSN 具有数量巨大、分布密集、能量有限、计算能力与存储能力有限、易出故障以及网络拓扑结构经常变化等特点<sup>[6,7]</sup>。因此,设计出具有可扩展性、自组织性和能量有效性的传感器网络面临很多挑战,也由此引发了学者多年来对传感器网络研究的关注。



## 1.2 传感器网络的分类

基于不同的分类标准,可以将传感器网络划分成不同类型。根据传感器网络中的节点是否静止,可分为两种类型:如果传感器网络中所有节点都是静止的,则称该网络为静止传感器网络(static sensor network);如果网络中存在可移动节点,则称该网络为可移动传感器网络(mobile sensor network)。根据网络节点数可以将传感器网络分为小规模(small-scale)传感器网络 and 大规模(large-scale)传感器网络。根据应用场景的不同,传感器网络可分为二维传感器网络(2D sensor network)、三维表面传感器网络(3D surface sensor network)和三维传感器网络(3D sensor network)三种类型,下面着重介绍这三种传感器网络。

当传感器节点部署在陆地上时,由于节点大致分布于二维(或近似二维)平面上,且每个节点在其通信半径范围内具有若干可相互通信的邻居节点,形成二维流形(2-manifold),这些传感器节点通过自组织形成的网络称为二维传感器网络。例如,2002年,英特尔公司将传感器节点分布在葡萄园的每个角落,每隔一分钟监测一次土壤的温度、湿度和该区域内有害物的数量,以确保葡萄可以健康生长,这是世界上首个无线葡萄园,如图1.2(a)所示;同年,由英特尔的研究小组、加利福尼亚州大学伯克利分校和巴港大西洋大学的科学家把无线传感器网络技术应用于监视大鸭岛海鸟的栖息情况,如图1.2(b)所示。他们使用了包括光、湿度、气压计、红外传感器、摄像头在内的近10种传感器类型数百个节点,系统通过自组织无线网络,将数据传输到300英尺(1英尺=0.3048 m)外的基站计算机内,再由此经卫星传输至加利福尼亚州的服务器等。在这些应用场景中的传感器网络都是典型的二维传感器网络,这也是本书要讨论的主要场景。

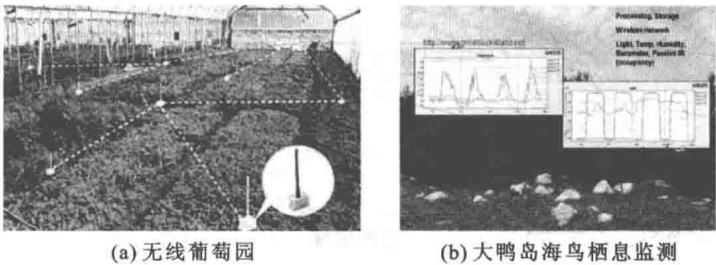
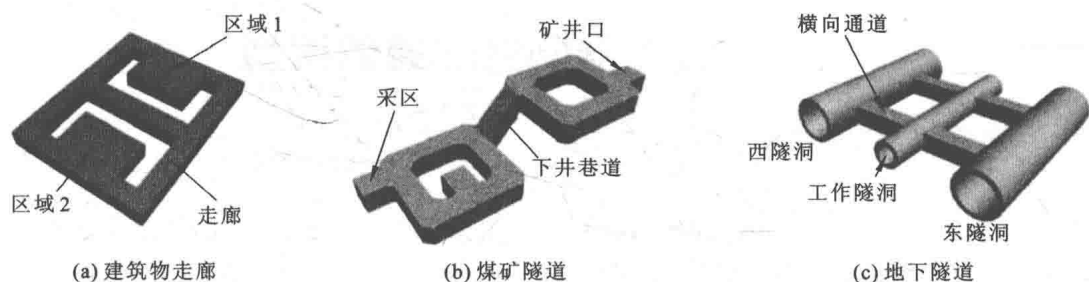


图 1.2 二维传感器网络应用场景

此外,传感器网络也被成功应用于建筑物走廊(图1.3(a))、煤矿隧道(图1.3(b))和地下隧道(图1.3(c))等场景中。在这些场景中,传感器节点通常播撒在复杂的三维表面上,这些节点通过自组织形成三维表面传感器网络。例如,李默等<sup>[8]</sup>将传感器节点播撒在真实煤矿中,用于监视煤矿安全,对地下垮塌引起的建筑结构异常可以迅速报警,同时在不稳定环境下还能准确有效地响应用户查询。

随着传感器网络的广泛应用,一些新场景也随之出现。近年来,传感器网络被成功应

图 1.3 三维表面传感器网络应用场景<sup>[9]</sup>

用于结构健康监测(structural health monitoring, SHM)方面,通过实时监测,以期对安全事故做到防患于未然<sup>[9]</sup>。例如,香港的汀九桥装有大量加速传感器、温度传感器和压力传感器,以便随时监测桥梁工作状态。又如,广州新电视塔在建时,就在关键位置上安置了传感器节点,通过周期性抽样对结构安全性进行监测。除此之外,传感器网络在商业、农业和地质等方面有潜在应用,如监测地下环境(如土壤酸碱度)、水与矿物含量、地下基础设施(如管道的完整性)或者大坝等地下部分的健康状态,以及通过监测土壤位移来预测山崩等。例如,地下传感器网络<sup>[10]</sup>就可以用来监测高尔夫球场、足球场和草地网球场之类的运动场所(图 1.4(a)),因为在这些场所中,土壤的状态对愉快的运动体验至关重要。同时,传感器网络在海底监测、海洋污染监测等水下环境也有成功应用,其体系结构如图 1.4(b)所示。例如,中国海洋大学利用水下传感器网络<sup>[11]</sup>来实时监测海洋水文和气象要素,保障了第十二届中华人民共和国全国运动会水上比赛项目的顺利进行。在有些特殊场合,为了监测水库或江河附近的土壤是否存在有毒、有害物质,地下传感器和水下传感器可以结合起来,形成一个混合网络来防范居民饮用水受到污染。显然与前述两种应用场景不同,这里的传感器节点被部署在三维空间区域,每个传感器节点可能被安放在不同高度,因而形成了三维传感器体网络(3D volume sensor network),简称三维传感器网络(3D sensor network)。

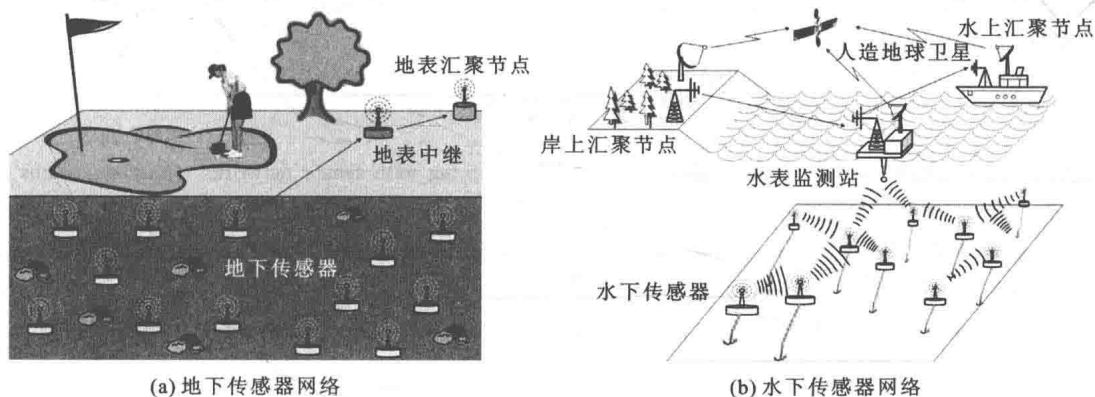


图 1.4 三维传感器网络应用场景

### 1.3 传感器网络的通信模型

一般地,传感器网络可被抽象成一个图

$$G=(V,E)$$

其中, $V$  是节点集合; $E$  是节点间的边的集合。根据节点间的连接方式,传感器网络的通信模型可划分为以下三种:单位圆模型(unit disk graph,UDG)<sup>[12,13]</sup>、准单位圆模型(quasi-unit disk graph,QUDG)<sup>[14]</sup>和对数正态模型(log-normal)<sup>[15]</sup>。

#### 1) 单位圆模型

在单位圆模型中,如果两个节点间的欧氏距离小于通信半径(假定所有节点的通信半径  $R$  均相同),则这两个节点互为邻居,或者说它们之间存在一条边;反之,这两个节点间不存在连接。这是一种非常理想化的通信模型,但许多算法往往假定其通信模型为 UDG 模型。

#### 2) 准单位圆模型

准单位圆模型是单位圆模型的一种推广。在准单位圆模型中,给定参数  $\alpha \in (0,1)$  和概率  $p \in (0,1)$ ,若两个节点间的距离小于  $(1-\alpha) \times R$ ,则这两个节点为邻居节点;若其距离在  $(1-\alpha) \times R$  至  $R$  之间,则这两个节点是邻居节点的概率为  $p$ 。否则,这两个节点为非邻居节点。显然,当参数  $\alpha=0$  时,准单位圆模型即为单位圆模型。

#### 3) 对数正态模型

在对数正态模型中,节点  $i$  和  $j$  存在连接的概率基于如下对数正态阴影模型(log-normal shadowing radio model)

$$p(\hat{r}) = \frac{1}{2} \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \alpha \frac{\log \hat{r}}{\xi} \right) \right], \quad \xi \triangleq \frac{\sigma}{\eta}$$

其中, $\hat{r}$  是节点  $i$  和  $j$  间的归一化距离; $\alpha = \frac{10}{\sqrt{2} \log 10}$  是常数; $\sigma$  是阴影标准差; $\eta$  是无路径指数(pathless exponent)。根据经验,参数  $\xi$  的取值范围通常为  $0 \sim 6$ <sup>[16]</sup>。对数正态模型的主要特征在于,归一化距离小于 1 的两个节点间可能不存在连接,而距离大于 1 的两个节点则以非零概率存在连接。

### 参 考 文 献

- [1] Szewczyk R, Osterweil E, Polastre J, et al. Habitat monitoring with sensor networks. *Communications of the ACM*, 2004, 47(6): 34-40.
- [2] Fennell M, Wishner R. Battlefield awareness via synergistic SAR and MTI exploitation. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 1998, 13(2): 39-43.
- [3] Cayirci E, Coplu T. Sendrom; Sensor networks for disaster relief operations management. *Wireless Networks*, 2007, 13(3): 409-423.
- [4] Green H. Technical wave 2: The sensor revolution. *Business Week Online*. [http://www.businessweek.com/magazine/content/03\\_34/b3846622.html](http://www.businessweek.com/magazine/content/03_34/b3846622.html).
- [5] Werff T J. Ten emerging technologies that will change the world. *MIT's Technology Review*. <http://www.globalfuture.com/mit-trends 2003.html>.