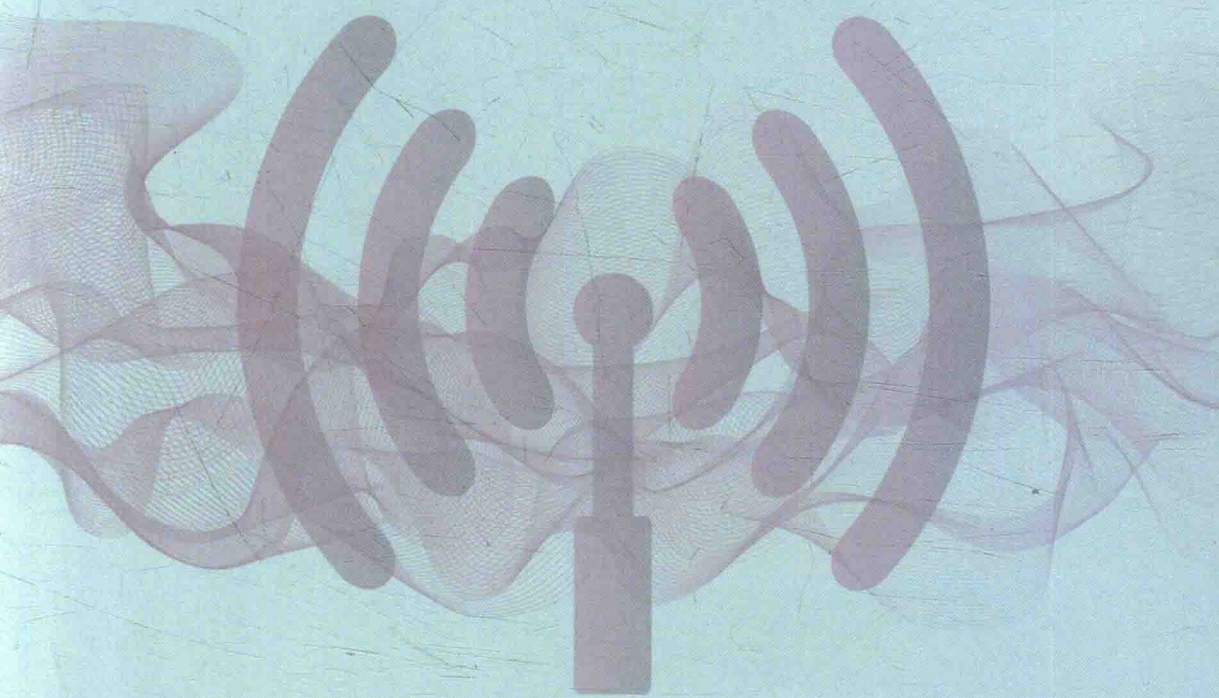


室内环境下无线传感器 网络定位和路由算法研究

Research on Localization and Routing Algorithms for
Indoor Wireless Sensor Networks

田 勇 著



辽宁省自然科学基金 (2015020005)

辽宁省教育厅科学研究一般项目 (L2013518) 资助

大连东软信息学院引进人才科研启动基金

室内环境下无线传感器 网络定位和路由算法研究

Research on Localization and Routing Algorithms
for Indoor Wireless Sensor Networks

田 勇 著

东北大学出版社

· 沈 阳 ·

© 田勇 2015

图书在版编目 (CIP) 数据

室内环境下无线传感器网络定位和路由算法研究 / 田勇著. — 沈阳: 东北大学出版社, 2015. 9

ISBN 978-7-5517-1085-5

I. ①室… II. ①田… III. ①无线电通信—传感器—计算机网络—路由选择—研究 IV. ①TP212 ②TN915.05

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 228556 号

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮编: 110819

电话: 024-83687331(市场部) 83680267(总编室)

传真: 024-83680180(市场部) 83680265(社务部)

E-mail: neuph@neupress.com

http://www.neupress.com

印 刷 者: 沈阳中科印刷有限责任公司

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 170mm × 240mm

印 张: 9.75

字 数: 191 千字

出版时间: 2015 年 9 月第 1 版

印刷时间: 2015 年 9 月第 1 次印刷

责任编辑: 孙 锋 潘佳宁

封面设计: 刘江旸

责任校对: 叶 子

责任出版: 唐敏志

ISBN 978-7-5517-1085-5

定 价: 31.50 元

近年来,互联网正不断朝着物联网(IoT, Internet of Things)方向发展,而IoT中连接的很多物体都要求具有感知环境和测试数据的能力,因此无线传感器网络(WSN, Wireless Sensor Networks)技术成为IoT发展的重要技术支撑,针对WSN的室内应用需求也随之不断增多。然而,现有的WSN关键技术大多适用于室外或者理想环境,在复杂室内环境下的应用效果却并不理想。因此,本书对室内WSN中的定位和路由算法进行了深入研究,其主要内容和研究成果如下。

(1) 通过对家居环境、办公环境和芯片生产环境测试数据的分析,总结了WSN在室内环境下的信号传输特征,为WSN在室内环境下的关键技术研究提供可靠依据。

(2) 针对典型的室内环境进行了无线传感器节点的信道传输特性测试,并对测试数据进行了拟合。拟合结果表明,与经典的单折线和双折线模型相比,提出的三阶多项式对数距离路径损耗模型能够更好地表征WSN在室内环境下的信道衰落情况。

(3) WSN用于复杂的室内环境时,无线信道随环境变化的衰落使得自适应地评估目标节点的位置变得非常困难。因此,本书分别提出了基于单折线模型和基于三阶多项式模型的WSN室内环境自适应定位算法。在两种算法中,计算机首先利用固定节点传来的数据建立模型的参数集合,并根据环境的变化定时更新该集合;接下来,利用提出的参数选择方法搜索并确定模型参数;最后,分别采用迭代的方法和最大似然估计的方法对目标节点进行定位。实验测试结果验证了两种定位算法良好的定位精度。

(4) 针对静态的理想室内环境,提出了一种能量均衡的稳定分簇路由算

法 EBSC (Energy-Balanced Steady Clustering), 该算法每轮产生的簇头数量稳定, 综合了分布式和集中式分簇算法的优点; 针对动态的复杂室内环境, 提出了一种能量均衡的自适应分簇路由算法 EBACR (Energy-Balanced Adaptive Clustering Routing), 该算法根据传输路径损耗和剩余能量信息选择各类节点, 并采用不同主观系数的多属性决策方法, 自适应地建立路由。实验结果表明, 以上两种算法不仅高效地利用了网络节点有限的能量, 而且均衡了节点的能量消耗。

(5) 针对芯片生产企业对环境的严格要求, 设计了基于 WSN 的芯片生产超净间环境监测系统, 并在系统中利用了本书提出的 EBACR 算法建立路由。通过在芯片生产超净间的测试, 验证了该系统不仅能够实时监测环境变化, 而且能够保证传感器节点能量消耗的有效性和均衡性。

主要符号表

符 号	代表意义	单 位
f	频率	Hz
P_t	发射功率	W
P_r	接收功率	W
G_l	收发天线增益的乘积	W^2
λ	波长	m
d	收发节点间的距离	m
h_t	发射节点的天线高度	m
h_r	接收节点的天线高度	m
G_t	发射节点的天线增益	W
G_r	接收节点的天线增益	W
$L(d)$	距离发射节点为 d 处的路径损耗	dB
$L_0(d_0)$	距离发射节点为 d_0 处的路径损耗	dB
n	路径损耗衰减因子	
d_0	发射节点和参考点之间的距离	m
X_σ	阴影衰落引起的高斯分布随机变量	dB
μ	随机变量的均值	dB
σ	随机变量的标准差	dB
L_{b1}	距离发射节点为 b_1 处的路径损耗	dB
L_{b2}	距离发射节点为 b_2 处的路径损耗	dB
n_1	路径损耗衰减因子	
n_2	路径损耗衰减因子	
$X_{\sigma 1}$	阴影衰落引起的高斯分布随机变量	dB
$X_{\sigma 2}$	阴影衰落引起的高斯分布随机变量	dB
μ_1	随机变量的均值	dB
μ_2	随机变量的均值	dB
σ_1	随机变量的标准差	dB
σ_2	随机变量的标准差	dB
d_b	双折线距离损耗模型的突变点	m
d_f	第一菲涅耳区的被阻挡距离	m
a_i	多项式路径损耗模型的衰减因子	

续表

符 号	代表意义	单 位
χ^2	拟合曲线的卡方量	
L_j	第 j 个路径损耗测量值	dB
$\hat{L}_j$	第 j 个路径损耗拟合值	dB
χ_r^2	约化的卡方量	
α	显著水平	
F_α	拒绝域临界值	
R_{NL}	拟合优度指标	
s_{i-PS}	固定节点 s_i 的参数集合	
Δn	路径损耗衰减因子误差	
$\Delta L_0(d_0)$	距离发射节点为 d_0 处的路径损耗误差	dB
E_{elec}	发射或者接收单位比特数据电路的能耗	nJ/bit
ε_{fs}	功率放大电路的放大能量系数	pJ/bit/m ²
ε_{mp}	功率放大电路的放大能量系数	pJ/bit/m ⁴
d_T	传感器节点能量消耗模型的阈值	m
l	传输数据的长度	bit
E_{da}	融合单位比特数据电路的能耗	nJ/bit
MAD	传感器节点多属性决策的结果	
u_{jk}	第 j 个邻居节点的第 k 个归一化属性	
num	评估属性的个数	
w_k	主观权重系数	
w'_k	客观权重系数	
β	主客观权重系数的比率	
p_j^k	第 j 个邻居节点的第 k 个属性的概率	
RE_i	簇头 i 的剩余能量	J
RE_{j-cur}	节点 s_j 当前的剩余能量	J
E_{j-sm}	节点 s_j 向簇头发送消息所消耗的能量	J
E_{j-id}	节点 s_j 向簇头传输数据所消耗的能量	J
RC_{CH_i}	簇头 CH_i 的路由候选节点集合	
E_{2hop}	簇头多跳传送数据消耗的总能量	J
E_{1hop}	簇头直接传送数据到基站消耗的总能量	J

续表

符 号	代表意义	单 位
$RSSI_{BS-S}$	基站发射信号功率值转换的 RSSI 值	dBm
$RSSI_{i-BS}$	节点 i 接收基站信号的 RSSI 值	dBm
$RSSI_{N-S}$	节点的固定传输功率对应的 RSSI 值	dBm
$RSSI_{BS-M}$	BS 能够识别的最小 RSSI 值	dBm
w_{E-CH}	用于选择簇头的能量属性主观权重	
$w_{RSSI-CH}$	用于选择簇头的 RSSI 属性主观权重	
w_{E-R}	用于选择转发节点的能量属性主观权重	
w_{RSSI-R}	用于选择转发节点的 RSSI 属性主观权重	
MAD_{i-CH}	选择簇头的多属性决策值	
	选择转发节点的多属性决策值	
$Flag_{i-BS}$	节点是否能够与基站直接通信的标志位	
S_{i-N}	传感器节点 s_i 的邻居节点集合	

第1章 绪 论..... 1

- 1.1 物联网概述 1
 - 1.1.1 物联网的定义 1
 - 1.1.2 物联网的发展 2
 - 1.1.3 物联网的应用 3
- 1.2 本书的研究意义 8
- 1.3 本书的研究内容及结构安排 10
 - 1.3.1 研究内容 10
 - 1.3.2 结构安排 12

第2章 室内无线传感器网络信号传输特征分析 13

- 2.1 引 言 13
- 2.2 测试系统硬件 13
 - 2.2.1 无线传感器节点 13
 - 2.2.2 基站和接口板 16
- 2.3 测试系统软件 17
- 2.4 家居环境测试 18
 - 2.4.1 测试部署及测试方法 19
 - 2.4.2 测试结果 21
 - 2.4.3 测试结果分析 26
- 2.5 办公环境测试 27

2.5.1	测试部署及测试方法	28
2.5.2	测试结果	29
2.5.3	测试结果分析	32
2.6	芯片生产环境测试	33
2.6.1	测试部署及测试方法	34
2.6.2	测试结果	34
2.6.3	测试结果分析	36
2.7	本章小结	38

第3章 室内无线传感器网络信道传输路径损耗模型研究 39

3.1	引言	39
3.2	相关研究	40
3.2.1	基本原理	40
3.2.2	国内外研究现状	42
3.3	测试环境和测试方法	44
3.4	单折线和双折线模型	44
3.5	测试结果及拟合	45
3.5.1	测试结果	45
3.5.2	测试结果拟合	48
3.6	拟合结果分析	49
3.6.1	拟合多项式模型阶数的选择	49
3.6.2	三阶多项式对数距离路径损耗模型	51
3.6.3	三阶多项式模型的回归分析	52
3.6.4	三阶多项式模型与双折线模型的比较	53
3.7	本章小结	54

第4章 室内无线传感器网络定位算法研究 55

4.1	引言	55
4.2	相关研究	55
4.2.1	基于测距的定位	56
4.2.2	基于非测距的定位	58
4.2.3	基于室内环境的定位	60
4.3	信道传输路径损耗模型	63

4.4 问题分析	63
4.5 基于单折线模型的自适应定位算法	64
4.5.1 单折线模型的参数集合	65
4.5.2 目标节点的定位	67
4.6 基于三阶多项式模型的自适应定位算法	69
4.6.1 三阶多项式模型的参数集合	69
4.6.2 目标节点的定位	70
4.7 实验结果	71
4.8 本章小结	74

第5章 室内无线传感器网络路由算法研究 75

5.1 引 言	75
5.2 相关研究	76
5.2.1 分簇路由算法	77
5.2.2 以数据为中心的路由算法	80
5.2.3 基于位置的路由算法	83
5.2.4 基于室内环境的路由算法	84
5.3 系统模型	86
5.3.1 传感器节点能量消耗模型	86
5.3.2 传感器节点信道传输路径损耗模型	87
5.3.3 多属性决策模型	87
5.4 静态的理想室内环境路由算法	89
5.4.1 EBSC 路由算法	90
5.4.2 消息复杂度分析	93
5.4.3 实验结果	93
5.5 动态的复杂室内环境路由算法	96
5.5.1 问题分析	97
5.5.2 EBACR 算法	98
5.5.3 EBACR 算法分析	103
5.5.4 EBACR 算法实验结果	109
5.6 本章小结	112

第 6 章 室内无线传感器网络路由算法在环境监测系统中的应用 ... 114

6.1 引 言	114
6.2 实验环境	114
6.3 系统体系结构	116
6.4 系统路由实现	117
6.5 系统测试	119
6.5.1 测试数据	121
6.5.2 数据分析	122
6.6 本章小结	125

第 7 章 结论与展望 127

7.1 研究总结	127
7.2 研究展望	128

参考文献	130
------------	-----

第1章 绪论

互联网已经彻底地改变了人们的工作、生活和思维方式,使人们能够随时随地联系任何人。随着技术的发展,传感器、微处理器和射频芯片的价格变得越来越低,这就使得将其嵌入到日常生产生活的各种物体中成为可能,从而推动互联网朝着物联网(IoT, Internet of Things)的方向发展^[1]。IoT就是把具有标识、感知和智能处理能力的物体,采用通信技术互联而成的网络。这些网络无需人工干预即可实现协同和互动,其主要目的是提供智能服务^[2]。IoT应用极其广泛,可用于智能家居^[3-5]、智能交通^[6-8]和环境监控^[9]等领域。以上各类应用均需要IoT中的物体具有感知环境、智能处理和无线传输的能力,因此无线传感器网络(WSN, Wireless Sensor Networks)在IoT中起到关键作用,其可以被看作IoT的一种感知延伸网络,为IoT提供感知的信息和网络节点的连接^[10]。因此,WSN关键技术的研究是IoT发展的重要技术基础。

1.1 物联网概述

“物联网”一词最早由美国麻省理工学院 Auto-ID 中心主任 Kevin Ashton 教授于 1999 年在研究 RFID (Radio Frequency IDentification) 时提出^[11],当时,互联网甚至还没有流行。随着互联网的发展,人们能够从网络上获得大量有用的数据,但是这些数据的获取需要人为干预。然而,社会和经济系统不仅建立在数据和信息基础之上,更重要的是建立在周围物体的基础上。IoT 的目标就是在不需要人为干预的情况下,使计算机能够感知周围的物体,并直接与物体互联,进而使人们通过互联网获得真实世界的任何信息。毫无疑问,IoT 将对人们日常生活的各个方面产生巨大的影响。

1.1.1 物联网的定义

在美国麻省理工学院 Auto-ID 中心^[12]提出并解释了“物联网”后,国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)于 2005 年正式称“物联网”为“The Internet of Things”,并发布了《ITU 互联网报告 2005:物联网》^[13],该报告深入探讨了 IoT 的核心技术及其对全世界商业和人们生活的影

响。报告指出 IoT 是互联网应用的延伸,其核心技术包括 RFID 技术, WSN 技术, 纳米技术和智能嵌入技术^[14]。欧洲 IoT 研究项目组 (European Research Cluster on the Internet of Things, IERC) 在 2009 年公布的《物联网研究战略路线图》(Internet of Things Strategic Research Roadmap)^[15]中给出的“物联网”定义为: IoT 将是未来互联网的重要组成部分,是动态的全球性基础网络,它具备通过标准和通用的通信协议进行自组织的能力,处于其中的实际及虚拟的“物”都将拥有身份标识、实体属性和虚拟特性,并且可以通过智能接口与信息网络进行无缝整合。

目前普遍使用的“物联网”的定义为^[10,13,14,16~18]: IoT 是将各种信息传感设备,例如射频识别装置、无线传感器、红外感应器、全球定位系统、激光扫描器等,按照约定的协议,与互联网连接起来,通过信息的交换和通信,实现人与物的智能识别、目标的定位和跟踪、环境的监控和管理的一个巨大网络。

1.1.2 物联网的发展

IoT 是下一代信息和网络技术领域的重大变革,是继计算机、互联网和移动通信网络蓬勃发展之后的第三次信息产业浪潮,因此得到包括中国在内的很多国家以及众多企业和学术界的重视。目前,国外的 IoT 研究以及应用主要集中在美国、欧洲、日本、韩国等国家和地区,但各国基本都处于技术研究和试验阶段。

美国于 1999 年提出 IoT 的概念并开始 IoT 相关技术的研究,并在 2009 年美国工商领袖的“圆桌会议”上,IBM 公司 CEO 提出“智慧地球”^[19]的概念后,将 IoT 设定为美国的国家战略^[20]。该战略认为将来的信息产业主要任务就是把传感器嵌入到电网、铁路、桥梁、隧道、公路、建筑、供水系统、大坝、油气管道等各种物体中,并全部连接形成 IoT,通过强大的计算机群,对整个网络实施管理和控制^[20]。随后颁布的《经济复苏和再投资法》对上述战略加以落实,并积极推动能源、宽带和医疗三大领域开展 IoT 技术的应用^[21]。同时,美国众多高校以及企业也积极加入 IoT 的产业链,例如加州大学伯克利分校、麻省理工学院、奥本大学、IBM、Crossbow Technology 公司等^[22]。

欧盟委员会也对 IoT 高度重视,并于 2009 年将 IoT 列为欧洲信息通信技术的战略性发展计划^[23]。同年,欧盟还发布了《欧洲物联网行动计划》(Internet of things: An action plan for Europe)^[24],首次系统地描述了 IoT 在世界范围内的发展和管理模式,并提出 2010、2015、2020 年三个阶段欧盟在 IoT 方面的研发路线图^[25],其目的是力争在 IoT 迅速发展的过程中处于世界先进水平,并确保欧洲主导 IoT 的建立过程。此外,欧盟的各大电信运营商和设备制造商已经成功设计并使用了很多 IoT 的应用^[26]。

日本政府在 IoT 研究方面也不甘落后,早在 2004 年,就制定了针对 IoT 发

展的 U-Japan 战略^[27], 该战略希望在日本建立一个随时、随地、任何物体、任何人都能连接在一起的泛在网络社会。2009 年日本政府对 U-Japan 战略进行了调整, 发布了 I-Japan 战略, 该战略规划将数字信息技术应用于电子化政府治理、医疗健康信息服务、教育与人才培养等公共事业, 从而推动 IoT 的不断发展^[28]。

在日本提出 U-Japan 战略后, 韩国政府于 2006 年提出了 U-Korea 战略^[20], 该战略旨在建立一个民众能够随时随地享有便利生活服务的社会, 希望通过推动 IoT 的发展, 增强产业优势和国家竞争力。2009 年, 韩国通信委员会发布了《物联网基础设施构建基本规划》^[25], 提出了韩国在 IoT 方面的努力目标, 决定大力发展 IoT 基础设施、IoT 服务、IoT 技术和 IoT 扩散环境等领域, 大力支持 12 项 IoT 详细课题。

我国也是 IoT 研究起步较早的国家, 早在 1999 年中科院就开始了传感网的研究, 并成立了微纳传感网工程技术研发中心^[26]。2009 年 8 月, 在温家宝总理提出“感知中国”理念后, 掀起了我国 IoT 研究和应用开发的热潮。同年 11 月, 温总理在题为《让科技引领中国可持续发展》的讲话中, 将 IoT 列为国家五大新兴战略性新兴产业之一^[29]。2010 年 3 月, 温总理在政府工作报告中要求加快 IoT 的研发和实际的应用, 加大对战略性新兴产业的投入和政策支持, 这表明我国已将 IoT 的发展提升到国家战略的高度。2011 年 11 月, 依据《中华人民共和国国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要》和《国务院关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》, 工业和信息化部制定并发布了《物联网“十二五”发展规划》(以下简称《规划》)。《规划》分析了我国 IoT 发展的现状和面临的形势, 提出了“十二五”期间 IoT 发展的目标, 确定了八项主要任务, 规划了五项重点工程, 并阐述了支持 IoT 发展的保障措施^[30]。在此过程中, 我国政府还营造了良好的 IoT 发展政策环境, 《国家中长期科学与技术发展规划(2006—2020)》、《2009—2011 年电子信息产业调整和振兴规划》、2010 年“新一代宽带移动无线通信网”国家科技重大专项、国家重点基础研究发展计划(973 计划)、国家自然科学基金、国家“863”计划、国家科技重大专项等都将 IoT 的相关技术作为重点研究和对象^[14]。

1.1.3 物联网的应用

未来的 IoT 将支持任何人和物之间的彼此互联, 并且这种连接可以在任意网络平台上实现, 图 1.1 即为 IoT 的 6A 连接图^[31]。IoT 建设的主要目标是气候、食物、能源、数字社会和健康应用等领域创建智能的环境和具有意识的智能物体, 其示意图如图 1.2 所示^[31]。由图中可知, 未来 IoT 的应用包括了工业、环境和社会的各个领域。

Internet of Things

Connecting:

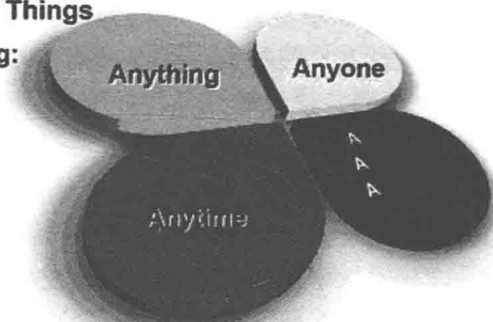


图 1.1 IoT 6A 连接图

Fig. 1.1 Internet of things-6A connectivity

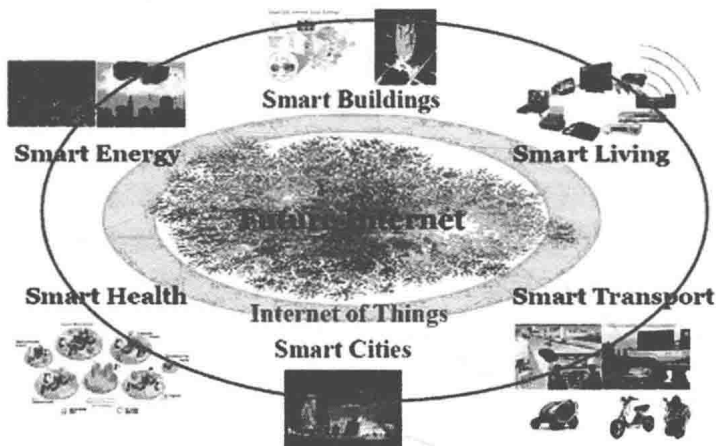


图 1.2 构建的 IoT 智能环境

Fig. 1.2 Smart environments creation for internet of things

1. 物流和交通领域

IoT 时代的汽车、火车、公共汽车、自行车以及公路和铁路都将安装大量的传感器、驱动器和处理器，公路、铁路和运输的货物也都配备标签和传感器。这些标签和传感器构成 WSN，可以发送重要的信息给交通控制中心；实时地发送更好的交通路线给各种交通工具；提供优化的交通信息给旅游者；监控运输货物的状态。

在物流领域中，IoT 利用 RFID 标签和无线传感器获取货物和运输车辆的信息，并将数据传送至信息处理中心，信息处理中心结合地理信息系统和货物的相关信息选择运输的最佳路径，并将信息发送给运输车辆，从而缩短了运输时间，提高了运输效率，同时物流公司和货物所有者能够实时掌握运输车辆和货物的状态。这样，IoT 不仅能够为企业节省物流成本，提高物流企业的利润，而且会给依赖物流的零售和供应链管理等行业带来巨大的好处^[32]，这就是未来的智能物流。智能物流的研究已经取得很大进展，并已有很多应用，例如由



Auto-ID 中心提出,并由 EPC Global 大力推广的电子产品码 (Electronic Product Code, EPC)、美军已在全球部署的“联合总资产可视化系统 (Joint Total Asset Visibility, JTAV)”、国际运输信息跟踪 (International Transportation Information Tracking) 系统、很多企业应用的“从田间到餐桌”的食品物流系统等^[33]。

在交通领域中,未来的城市交通是一个有机的整体,汽车与汽车、汽车与交通设施、汽车和交通设施与信息处理中心都通过 WSN 进行信息连接,通过车联网、电力化和自动驾驶等技术构建城市的智能交通系统。汽车不再是独立的个体,而是庞大智能交通系统中的一员。智能交通系统能够将汽车分流到不同的区域内,再加上智能的汽车驾驶系统,所有的汽车如同大海中的鱼群,快速在马路上穿行却彼此永不相撞^[34]。目前,很多国家都在进行智能交通系统的研究,例如美国通用汽车研发的“V2V (Vehicle to Vehicle) 汽车防撞预警系统”,欧盟执行委员会赞助的“Talking Cars”系统,日本日立公司解决交通堵塞的 ITS (Intelligent Transport System) 系统,我国及其他很多国家都在研究或使用的不停车收费 (Electronic Toll Collection, ETC) 系统、辅助驾驶系统、移动预约车位系统、行车事故自动记录系统、交通视频监控系统等^[35]。

2. 医疗和健康护理领域

医疗和健康是人类共同关心的问题,IoT 时代的医疗和健康护理领域将 RFID 及无线传感器等信息化技术应用于病人、医生、医院、药品、医疗仪器等,并且通过 WSN 全部连接到信息化处理中心,打造高效、便捷、以人为本的医疗和健康护理服务体系。

智能移动化医疗服务信息系统就是以 RFID 和 WSN 为技术基础,病人通过携带的 RFID 手环存储自己的信息,医护人员可以通过移动终端设备或者带有 RFID 读取设备的计算机随时随地从医院的信息化平台中读取病人的诊疗信息,根据这些信息和临床检查结果,制订治疗方案,极大地提高了工作的效率^[36]。另外,IoT 在医院的信息化平台建设、药品管理、医疗设备管理、医疗废弃物处理等方面也将大有作为。

随着全球逐步进入老龄化社会,人们对于远程健康护理方面的需求日益增加,IoT 技术和医护人员专业知识的结合,在远程护理、疑难杂症的诊断和保健康复中发挥重要作用。由于健康产业的巨大市场前景,很多国家都进行了相关研究,例如美国加州“健康英雄网 (Health Hero Network)”的“健康伴侣服务系统 (Health Buddy System)”,在使用人体各项指标动态监测设备的基础上,以 WSN 的方式,实时与医院及护理中心相连,对患者病情进行实时监测,其监测的项目和疾病超过 45 种。除此之外,基于 IoT 的健康服务系统还包括美国 Fitbit 公司开发的睡眠传感监测系统,美国 Body Trace 公司推出的体重跟踪传感监控系统,美国 VITALITY 公司开发的智能药罐,日本象印公司开发的智能热水瓶,德国弗朗和费研究所研发的智能手杖,美国 Oatfield Estates 公司