

基于蚁群算法的 WSN 移动信标路径获取研究

徐云剑^{1,2}, 彭沛夫¹, 郭艾寅^{2,3}, 张桂芳²

XU Yun-jian^{1,2}, PENG Pei-fu¹, GUO Ai-yin^{2,3}, ZHANG Gui-fang²

1. 湖南涉外经济学院, 长沙 410205

2. 湖南师范大学 物理与信息科学学院, 长沙 410081

3. 湖南师范大学 数学与计算机科学学院, 长沙 410081

1. Hunan International Economics University, Changsha 410205, China

2. College of Physics and Information Science, Hunan Normal University, Changsha 410081, China

3. College of Mathematics and Computer Science, Hunan Normal University, Changsha 410081, China

E-mail: xuyunat2007@163.com

XU Yun-jian, PENG Pei-fu, GUO Ai-yin, et al. Study of getting mobile beacon path in Wireless Sensor Networks based on ant colony algorithm. *Computer Engineering and Applications*, 2008, 44(28): 109-112.

Abstract: The equal distance 3-improved-coverage number of beacon sending position is presented according the acreage of ROI (Region of Interest). Then a simple method is put forward to calculate the coordinates of the sending positions in rectangular ROI. Aiming at the shortage of the existent sequence algorithm, when beacon moves according to the path and emits RF signals at every position, the ant colony algorithm is applied to the position sequence so as to get the beacon sending position. Further, in this algorithm the sensors could work out their position with trilateration. Experimental results demonstrate that the localization method for sensor node in this paper makes obvious progress than the existent ones both on the precise and on the efficiency.

Key words: sensor network; sensor localization; mobile beacon; ant colony algorithm; optimal path

摘要: 根据 ROI (Region of Interest) 面积给出了等距三重优化覆盖此 ROI 所需要的信标发射位置数量计算方法; 随后对矩形 ROI 提出了一种简单的信标发射位置确定方法; 针对现有的遍历发射位置点的路径遍历算法的不足, 提出了一种新的应用蚁群算法的信标发射位置点的遍历算法, 并利用该算法对基于三边测量方法进行传感器节点定位。仿真实验表明, 采用该文提出的方法对传感器节点进行定位, 在定位的精度和定位的效率方面与现存的方法相比有明显的提高。

关键词: 传感器网络; 传感器定位; 移动信标; 蚁群算法; 最优路径

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2008.28.037 **文章编号:** 1002-8331(2008)28-0109-04 **文献标识码:** A **中图分类号:** TP393

1 引言

无线传感器网络 (Wireless Sensor Networks) 是由部署在监测区域内的大量微型、低成本、低功耗的传感器节点组成的多跳无线网络, 实现监测区域内敏感数据的采集、处理和传输。作为连接物理世界和数字世界的桥梁, 传感器网络在国防军事、环境监测、交通管理等众多领域极具应用前景, 成为近几年国内外研究的热点。在传感器网络中, 确定节点或事件发生的位置对其监测活动至关重要, 其中, 节点自身的准确定位不仅是提供监测事件或目标位置信息的前提, 也是提供网络拓扑自配置、提高路由效率、向部署者报告网络的覆盖质量以及为网络提供命名空间等网络功能的基础。

在传感器节点中应用 GPS 系统进行定位是种极为自然的

想法。但是, 考虑到传感器网络中各节点的体积、能源以及整个网络费用方面的限制, 在每个节点上装备 GPS 系统并不现实, 而且 GPS 也无法在室内等环境下工作。因此, 利用各传感器之间的相对距离来进行传感器定位就成了人们更好的选择。根据所采用的不同定位原理, 目前常用的节点定位方法可分为两种^[1]: Range-Based 和 Range-Free。前者的定位较为精确, 但计算和通信开销较大; 后者的定位精度较低, 但各方面开销较小, 适用于低功耗、低成本的应用领域。本文更注重传感器网络在精确定位领域的应用, 所以本文的研究是基于较高精度的 Range-Based 定位机制。

Range-Based 定位机制中, 传感器网络中的节点可分为两类: 一类节点是不具备测量自身坐标能力的普通节点, 它们是

基金项目: 湖南省自然科学基金 (the Natural Science Foundation of Hunan Province of China under Grant No.06JJ5116); 湖南省教育厅自然科学基金 (the Natural Science Foundation of Department of Education of Hunan Province of China under Grant No.05C408)。

作者简介: 徐云剑 (1977-), 男, 讲师, 主要研究领域为优化算法、无线传感器网络路由算法; 彭沛夫 (1955-), 男, 教授, 硕士生导师, 主要研究领域为优化控制, 水印技术; 郭艾寅 (1980-), 女, 硕士研究生, 主要研究领域为实时与尽力服务, QoS; 张桂芳 (1969-), 女, 讲师, 主要研究领域为分布式数据库, 信息安全, 数字水印。

收稿日期: 2008-06-05 **修回日期:** 2008-09-04

网络的主体;另一类节点装备了 GPS 之类的定位工具,能够测量自身的坐标,通常被称为信标节点或 Beacon,它们散布在整个传感器网络部署的区域中。通过测量普通节点到信标节点的距离或角度信息,然后使用三边测量(trilateration)、三角测量(triangulation)的定位法就可以计算出节点位置^[2]。在这种定位方式中,信标节点的排布方式和数量对最终的定位精度影响很大,使用较多的信标节点会提高定位的精度,但是这将增加架设网络的开销。而且,当定位工作完成后,信标节点就作用不大了。所以,在传感器网络中,使用过多的信标节点是一种较大的浪费。鉴于此,本文参考了文献[3]提出了基于移动信标(mobile beacon)进行节点定位的思想,利用 1 个信标节点在“感兴趣区域(Region of Interest,简称 ROI)”中移动,同时发送无线电信号,未定位的普通节点可据此测定自身与信标节点的相对距离或角度,然后根据多个测量结果进行定位。

信标节点按一条怎样的路径来移动呢?移动到怎样的位置后发射用来测距的无线电信号呢?信标节点移动的路径长短和发射位置的多少将决定定位工作的时效和功耗。文献[4]虽然提出了一种螺旋式的信标移动路径,但这种路径无法充分而高效地覆盖 ROI,容易出现信标覆盖盲区,从而降低定位精度。因此,本文使用了一种三重优化覆盖的方法来选取最少的发射位置,并在此基础上提出了一种基于改进蚁群算法的信标移动路径选择算法,并在仿真部分证明,应用该算法进行传感器定位,有效提高了定位的效率同时降低了定位过程的功耗。

2 WSN 移动信标路径的相关研究

2.1 无线传感器网络中的测距技术 RSSI

在无线传感器网络中,常用的测量节点间距离或角度的技术有 RSSI、TDOA、AOA、TOA。本文中信标节点测距采用的是^[5]RSSI(Received Signal Strength Indicator):已知发射信号节点(信标节点)的发射功率,在接收节点(普通节点)测量所接收到的功率的大小,计算传播损耗,使用理论或经验的信号传播模型将传播损耗转化为距离,该技术主要使用 RF 信号。因传感器节点本身具有无线通信能力,故其是一种低功率、廉价的测距技术。但是 RSSI 的测量结果会有一定的误差,它的主要来源是环境影响所造成的信号传播模型的建模复杂性、反射、多径传播、非视距(Non-Line of Sight, NLOS)、天线增益等因素。

2.2 节点定位计算方法——三边测量法

应用了三边测量法来定位普通节点。在二维空间中,知道了一个点到 3 个或 3 个以上锚节点的距离,就可以确定该点的坐标。如图 1 所示,三边测量定位法^[6]的基本原理就是求 3 个已知半径和坐标圆心的圆的交点。由于节点间测距存在误差,实际应用中图 1 所示的 3 个圆往往无法交于一点,为求解使估计坐标与实际坐标差异最小的点,常常使用最小二乘估计的原理来计算未知节点的坐标。



图 1 三边测量定位

2.3 蚁群算法

本文选用典型的 TSP 问题为例阐述基本的蚁群算法模

型^[7]。TSP 问题就是寻找一条闭合回路,该回路能够访问所有的城市一次,并且走这条回路所用的费用是最少的。设 m 是蚁群中蚂蚁的数量, $d_{ij}(i,j=1,2,\dots,n)$ 表示城市 i 和城市 j 之间的路径距离, $b_i(t)(i=1,2,\dots,n)$ 表示时刻 t 在城市 i 中的蚂蚁个数,

那么 n 座城市中蚂蚁的总数为 $m = \sum_{i=1}^n b_i(t)$; $\tau_{ij}(t)$ 表示 t 时刻在城市 i 与城市 j 连线上信息素的浓度,在初始时刻,各条路径上信息素的浓度相等,设 $\tau_{ij}(0)=C$, (C 为常数), α 表示蚂蚁在运动过程中所积累的信息, β 表示启发因子在蚂蚁选择路径中所起的作用程度, τ_{ij}^α 表示蚂蚁在运动过程中 i_j 城市连线上所积累的信息素浓度, η_{ij} 表示由城市 i 转移到城市 j 的期望程度, $\eta_{ij}^\beta(t)$ 表示在启发式因子作用下蚂蚁所选择的路径由城市 i 转移到城市 j 的期望程度(简称能见度),它由两城市的距离决定。当蚂蚁距某城市越近,蚂蚁就越有可能向该城市移动。设 $P_{ij}^k(t)$ 表示在 t 时刻第 $k(k=1,2,\dots,m)$ 只蚂蚁由城市 i 转移到城市 j 的概率,根据各条路径上的信息素的浓度决定转移方向:

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha \eta_{ij}^\beta(t)}{\sum_{s \in allowed_k} \tau_{is}^\alpha(t) \tau_{is}^\beta(t)} & j \in allowed_k \\ 0 & otherwise \end{cases}$$

式中 $allowed_k = \{n - tabu_k\}$: 表示蚂蚁 k 下一步允许选择的城市。即用 $tabu_k$ 表示第 $k(k=1,2,\dots,m)$ 只蚂蚁的禁忌表(tabulist),这种禁忌表的数据结构,储存有 t 时刻第 k 只蚂蚁已访问过的城市以及在各城市之间所走过的旅程,并禁止该蚂蚁再次访问这些城市,当蚂蚁完成一次合规则的旅行后,禁忌表可被用来计算它的当前解,即计算蚂蚁在本次旅行中所走过的总旅程。随着时间的推移,在各条路径上的信息素逐渐消逝,用参数 $1-\rho$ 表示信息素的消逝程度,经过 n 个时刻,蚂蚁完成一次循环,设 $\tau_{ij}(t+n)$ 表示蚂蚁经过 $t+n$ 时刻后在城市 i 城市 j 连线上残留的信息素浓度,则

$$\tau_{ij}(t+n) = \rho \tau_{ij}(t) + \Delta \tau_{ij}$$

$$\Delta \tau_{ij} = \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}^k$$

$\Delta \tau_{ij}$ 表示本次循环所有蚂蚁在路径 ij 上所释放的信息素浓度之和, $\Delta \tau_{ij}^k$ 表示第 k 只蚂蚁在本次循环中留在路径上 ij 上的信息素的浓度。 ρ 为系数,并规定系数 ρ 必须小于 1,以避免各条路径上的信息素的数量无限地累积。 $\Delta \tau_{ij}^k$ 的计算采取 Ant cycle system 模型:

$$\Delta \tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{L_k} & \text{if the } k\text{th ant uses edge}(i,j) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

式中 L 为第 k 只蚂蚁完成 1 次旅行时所走过的总路程, Q 为蚂蚁释放的信息素的总浓度,该模型利用了蚁群的整体信息,使用最为广泛。

3 移动信标发射位置的选择与发射位置坐标的计算

应用三边测量法定位普通节点至少需要从 3 个不共线的不同位置来测量信标节点到普通节点的距离,而这 3 个不同的位置就是移动信标节点的无线电信号发射位置。以所有发射位置为圆心,以 RSSI 最长延伸距离为半径的圆必须覆盖整个 ROI。同时,发射位置的数量在满足完全覆盖 ROI 的前提下要

尽可能少。

由此, 可以将发射位置以及位置数量的选择, 转换为求以传感器节点感知距离 R 为半径的圆, 对 ROI 的无漏洞最小覆盖问题。文献[8,9]提出: 当相等的 3 个圆 A 、 B 、 C 的圆心构成一个边长为 $\sqrt{3}r$ 的等边三角形时, 圆 A 、 B 、 C 形成的无漏洞重叠区域最小, 图 2(a) 是由 7 个相等的圆组成的无漏洞最小覆盖。因此, 信标节点的无线信号发射位置构成的等边三角形边长为 $\sqrt{3}r$, 那么信标信号发射位置最少且无线信号所覆盖整个 ROI。此时, 各信标发射点的覆盖范围将 ROI 划分为一系列紧密邻接的正六边形网格, 每个网格以信标发射点所在位置为中心, 边长为 r , 如图 2(b) 所示。

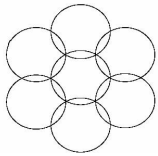


图 2(a) 无漏洞最小覆盖

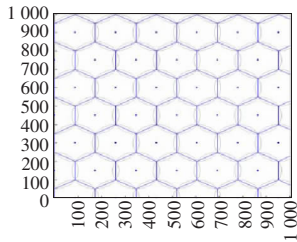


图 2(b) 无漏洞最小覆盖 ROI 网格

图 2(b) 所描述的覆盖称其一重覆盖, 三边测量法需要从 3 个不共线的位置测距。因此, 仅一重覆盖是不够的, 最少需要使用三重覆盖, 这样才能保证每个普通节点能感应到 3 个信标节点的测距信号。图 3 是由 3 组一重覆盖组成的对 ROI 的三重覆盖, 其中各发射点又构成了边长为 r 的正三角形, 称其为等距三重优化覆盖^[10]。等距三重优化覆盖较容易转化为坐标系中的一组坐标, 如图 3 所示为在一个矩形 ROI 中获取的构成等距三重优化覆盖的发射位置点集, 它们形成了一组正三角形网格(边缘区域除外)。

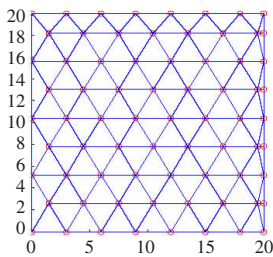


图 3 等距三重优化覆盖

由图 2(b) 可知, 一重覆盖 ROI 所需的发射位置数量即为覆盖该 ROI 的边长为 r 的正六边形数。其数量为:

$$Hex_num1_layer = \frac{Acreage_ROI}{Acreage_Hexagon} = \frac{Acreage_ROI}{\frac{3\sqrt{3}}{2}r^2} \quad (1)$$

显而易见, 等距三重优化覆盖的信标发射位置数量为 Hex_num1_layer 的 3 倍。

$$Hex_num3_layer = 3 \times Hex_num1_layer = \frac{Acreage_ROI}{\frac{\sqrt{3}}{2}r^2} \quad (2)$$

当 ROI 形状是标准矩形时(不妨假设其大小为 $A \times B$), 可根据 ROI 的各顶点坐标快速估算信标发射位置坐标。具体步骤如下:

步骤 1 首先根据 ROI 长度 A 计算每行中发射位置的数量; 接着根据 ROI 宽度 B 计算行数:

$$NodeNum_line = A/r \quad (3)$$

$$LineNum = 2 \times B / \sqrt{3}r + 1 \quad (4)$$

步骤 2 计算第 i 行第 j 号发射位置横、纵坐标。奇数行和偶数行的发射位置横坐标计算方法不同, 分别为: 若 i 为奇数, 则第 j 号发射位置横坐标为:

$$X_{ij} = (j-1) \times r \quad (5)$$

若 i 为偶数, 则第 j 号发射位置坐标为:

$$X_{ij} = A - (j-1) \times r \quad (6)$$

当每行发射位置的纵坐标仅与行号相关时, 计算公式为: 第 i 行所有发射位置的纵坐标为:

$$Y_{ij} = (i-1) \times \sqrt{3}/2 \times r \quad (7)$$

4 基于蚁群算法的移动信标路径选择算法步骤

得到 ROI 中的移动信标发射位置数量和具体的发射坐标后, 可以把一个个发射位置看做 TSP 问题中的城市, 由此引入蚁群算法, 其实现步骤如下:

Step1 初始化

设初始迭代次数 $Nc=0$, 为每条移动信标发射点间的路径 (r,s) 设置信息素强度初值:

$$\tau(r,s) = \tau_0, \Delta\tau(r,s) = 0$$

将 m 只蚂蚁随机地置于 n 个信标发射点上, 蚂蚁的禁忌表置空:

$$tabuk = \phi;$$

Step2 求解过程

$$\text{for}(i=1; i \leq n; i++)$$

$$\text{for}(k=1; k \leq m; k++) \{$$

将蚂蚁 k 所在的初始传感节点添加到 $tabuk$ 中;

If(蚂蚁 k 没有完成指定任务且禁忌表未满足)

{ 按照式(1)、(2)计算 P_{rs}^k , 蚂蚁 k 选择下一个将要访问的信标发射点 s ; 移动到发射点 s , 并将 s 添加到 $tabuk$ 中; 根据式(3)对路径 (r,s) 进行局部更新; }

Step3 全局更新

$$\text{for}(k=1; k \leq m; k++)$$

{

根据 $tabuk$ 分别找出本次循环中花费时间最短和最长的蚂蚁;

If (N 次迭代最优解无明显改进)

{按式(4)更新 ρ 值; }

按式(5)、(6)对最优的蚂蚁路径进行全局更新;

}

Step4 输出最优解

If (不满足终止条件){清空所有蚂蚁的禁忌表; 对每条路径 (r,s) , 置 $\Delta\tau(r,s)=0$; $Nc=Nc+1$; 返回 Step2; }

Else 返回最优解;

算法结束后, 得到了一条经过优化了的信标节点移动路径, 信标节点按照这条路径移动到每一个信号发射点进行传感器节点定位, 本文把这种新的定位方法称作蚁群定位法。

5 仿真实验

为了证明本文所提出的定位方法的有效性, 用文献[8]提出的螺旋线定位法与本文的定位方法进行比较。螺旋线定位法是将各发射点构成一条螺旋线, 信标节点在螺旋线上移动并发射信号, 即可对传感器实现定位。在实验中采用的螺旋线方程如下:

$$l = \frac{\sqrt{3}/2}{2\pi} r\theta \quad (8)$$

第 1 个信标发射点为 ROI 中心点, 每个发射点与螺线上前一发射点的间距为信标发射半径 r , 由螺线定位法得到的移动路径如图 4(a)所示; 蚁群算法所得移动路径如图 4(b)所示。

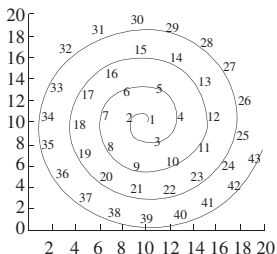


图 4(a) 螺线定位移动路径

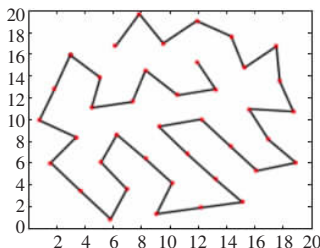


图 4(b) 蚁群定位移动路径

图 5 是螺线定位和蚁群定位的效果图, 从图中可以看出蚁群定位法的定位精度要好于螺线定位法, 而且, 蚁群定位法的信标节点移动路径长度和信标发射点数量要小于螺线定位法。

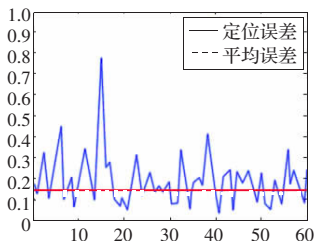


图 5(a) 蚁群定位误差

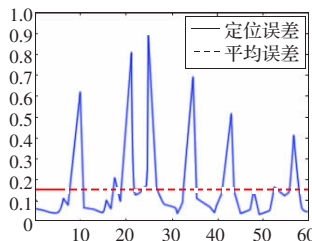


图 5(b) 螺线定位误差

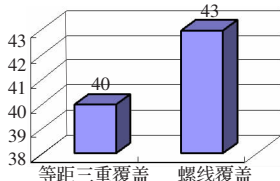


图 5(c) 信标发射点数量

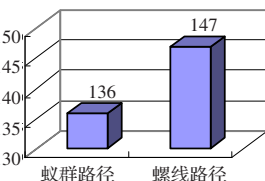


图 5(d) 信标移动路径长度

6 结束语

本文以矩形 ROI 为例, 引入等距三重优化覆盖、三边测量等方法来确定信标发射位置的数量并计算出具体发射点坐标。在遍历发射位置点的路径遍历算法方面, 针对现有算法的不足, 提出了一种新的应用蚁群算法的信标发射位置点遍历算

法。并利用该算法及 RSSI 技术对未知传感器节点定位。仿真实验表明, 采用本文提出的蚁群定位法对传感器节点进行定位, 在定位的精度和定位的效率方面与现存的方法相比有明显的提高。考虑到 ROI 的形状在实际应用中是复杂多边形的, 在复杂地形中进行传感器节点定位将是下一步的研究工作重点。

参考文献:

- [1] Wang FB, Shi L, Ren FY. Self-localization systems and algorithms for wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2005, 16(5): 857-868.
- [2] Niculescu D, Nath B. Position and orientation in ad hoc networks[J]. Ad Hoc Networks, 2004, 2(2): 133-151.
- [3] Sichitiu ML, Ramadurai V. Localization of wireless sensor networks with a mobile beacon[C]//Proc of the IEEE Int'l Conf on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems. [S.l.]: IEEE Computer Society, 2004: 174-183.
- [4] Sun GL, Guo W. Comparison of distributed localization algorithms for sensor network with a mobile beacon[C]//Proc of the IEEE Int'l Conf on Networking, Sensing and Control, 2004: 536-540.
- [5] Shi HC, Li XL, Shang Y, et al. Cramer-Rao bound analysis of quantized RSSI based localization in wireless sensor networks[C]//Proc of the IEEE/IFIP Int'l Workshop on Parallel and Distributed Embedded Systems (ICPADS). Fukuoka: IEEE Computer Society, 2005: 32-36.
- [6] 段渭军, 王建刚, 王福豹. 无线传感器网络节点定位系统与算法的研究和发展[J]. 信息与控制, 2006, 35(2): 239-244.
- [7] Dorigo M, Gambardella L M. Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem[J]. IEEE Transaction on Evolutionary Computation, 1997, 1(1): 53-66.
- [8] Zhang HH, Hou JC. Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks[J]. Wireless Ad Hoc and Sensor Networks, 2005, 1(1/2): 89-123.
- [9] Huang CF, Tseng YC. The coverage problem in a wireless sensor network[C]//Sivalingam KM, Raghavendra CS. Proc of the 2nd ACM Int'l Conf on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA). San Diego: ACM Press, 2003: 115-121.
- [10] 李石坚, 徐从富, 杨旸, 等. 面向传感器节点定位的移动信标路径获取[J]. 软件学报, 2008, 19(2): 455-467.

(上接 41 页)

表 2 是本文提出的算法同其它经典算法作用在 Lenna 上所得码书的性能比较。本文算法不仅比 ESA 和 SCLA 的运行时间大大的减小, 并且也提高了码书的质量。

表 2 本文算法同其它算法的性能比较

算法	ESA ^[4]	SCLA ^[5]	LBC ^[5]	本文算法
PSNR/dB	29.14	29.21	29.25	29.50
平均失真 D	79.21	77.89	77.42	72.25
运行时间/s	970	1 115	14	27

4 结论

为了克服传统 LBG 算法中的空腔现象, 本文提出了一种基于码字间距最大化的新的空腔策略。利用离现有码字的距离最大的输入矢量来修改腔中的码字, 实验结果表明: 本文提出的策略能有效地消除空腔现象, 获得性能较好的码

书, 其峰值信噪比比传统的 LBG 算法提高了 3 dB。与其它的一些改进的码书设计方法相比, 本文提出的算法不仅缩短了算法的运行时间, 而且提高了码书的性能。

参考文献:

- [1] Linde Y. An algorithm for vector quantizer design[J]. IEEE Trans Communi, 1980, 28(1): 84-95.
- [2] 王社国, 伟艳娜. 基于遗传算法的 VQ 码本设计及语音识别[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(17): 71-73.
- [3] 张基宏, 李霞, 谢维信. 一种随机竞争学习矢量量化图像编码算法[J]. 电子学报, 2000, 28(10): 23-26.
- [4] 雍正正, 罗萍, 吴青华, 等. 一种进化模拟退火矢量量化图像编码新算法[J]. 电子学报, 2001, 29(5): 653-656.
- [5] 罗雪晖, 李霞, 张基宏. 一种改进的 LBG 快速算法[J]. 深圳大学学报: 理工版, 2002, 19(4): 54-59.