基于射线跟踪和 Voronoi 图的室内定位算法*

袁正午[a], 王丹丹[b]
(重庆邮电大学 a. 计算机科学与技术学院; b. 中韩合作 GIS 研究所,重庆 400065)

摘　要: 传统的射线跟踪方法在离线数据采集时需要大量的求交运算,计算效率低,而传统的在线定位需要遍历数据库才能确定目标位置,为此,提出一种提高室内定位运算效率的新方法。该方法利用 Voronoi 图势力范围特性和局域动态特性,大大减少了离线阶段中射线与物体的求交次数;同时利用 Voronoi 图一级邻接点的特点,减少了在线阶段的匹配计算量。仿真结果表明了该方法的有效性。

关键词: 室内定位; 射线跟踪; Voronoi 图; 求交运算
中图分类号: TP301.6　　**文献标志码**: A　　**文章编号**: 1001-3695(2013)02-0399-03
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.02.022

Algorithm of indoor location based on Voronoi graph and ray-tracing

YUAN Zheng-wu[a], WANG Dan-dan[b]
(*a. College of Computer Science & Technology, b. Sino-Korea GIS Research Centre, Chongqing University of Posts & Telecommunications, Chongqing* 400065, *China*)

Abstract: The traditional methods make a large number of Intersection operations and matching operations in off-line and on-line, have the low computational efficiency. While traditional on-line positioning needs to traverse the database to identify the target location. This paper proposed a new method to improve the efficiency of indoor location. This method used sphere of influence features and local dynamic characteristics of voronoi diagram, reduced the intersection calculation between ray and objects in off-line, and used the first adjacent points of voronoi in the new position-fingerprint database, reduced the numbers of matching operations. The simulation result shows the effectiveness of the method.

Key words: indoor location; ray-tracing; Voronoi diagram; intersection operations

0　引言

基于位置的服务(location-based services,LBS)[1]被广泛认为是未来移动市场的杀手级应用,而精确的室内定位是实现室内 LBS 的关键技术。然而,在复杂的室内环境中移动终端无法接收全球导航卫星信号,让移动终端具备充足的导航精准度和可靠性是实现 LBS 服务的一大挑战。由于室内环境相对复杂,家具布局、内部结构、装饰装修情况等都会对室内定位的效果产生影响,传统的室内定位方法如红外线室内定位技术、超声波定位技术、射频识别技术等,受非视距传播、多径传播的影响,不能满足室内 LBS 的要求。室内定位分为离线阶段和在线阶段:离线阶段采集各个参考点的信号特征属性;在线阶段将预测的信号特征属性作为参考进行匹配定位[2]。基于几何光学理论及一致性绕射理论的射线跟踪方法,通过模拟信号的传播路径来确定多径信道中发射机与接收机之间所有可能的信号传播路径,从而计算场点的无线电参数[3],建立位置—指纹数据库,用于室内定位,大大提高了定位精度。在进行射线跟踪的过程中,由于要找出射线与障碍物的有效交点,射线要与环境中的每个障碍物求交,进而找出射线与障碍物的实际交点,这样大量的时间浪费在无用的求交计算上,所以必须采取有效的技术来降低计算量,目前常用的方法是分区加速算法。分区法是对环境中的物体进行分组或者划分网格,射线首先跟分组或者网格进行求交,若与分组或者网格相交,再将射线与对应分组或者网格内的建筑物进行求交,最后将相交物体进行排序,选取最近相交物体。例如,文献[4]将呈直线排列的物体分为一组进行分区,该方法对于排列规则的物体易于分区,但是室内环境下物体的布局通常是不规则的;文献[5]提出的是规则分区的方法,将物体所处环境分为规则四边形和立方体,该分区方法在一定程度上减少了射线与物体的求交次数,不足之处在于此种分区与物体分布的密集程度有很大关系。在线匹配阶段,根据测得的待定位点的信号特征属性,跟已建立的位置—指纹数据库中的各元组进行匹配查询,从而可确定待定位点的具体位置[6]。目前常用的匹配算法是 K-近邻算法[7]。此方法需要遍历数据库中所有数据,找出与待定位点属性相近的 k 个近邻,因此 k 值的选取至关重要。k 值过大会把与待定位点属性不相似的参考点引入,k 值过小会把与待定位点属性相似的参考点忽略,都会造成一定的误差。

本文利用 Voronoi 图的势力范围特性及局域动态特性等基本性质,在离线采集数据阶段对室内物体进行 Voronoi 多边形分区,减少求交运算的次数,在线匹配阶段利用 Voronoi 图一级

收稿日期: 2012-04-23; **修回日期**: 2012-05-20　**基金项目**: 重庆市教委 2011 年科学技术研究项目(KJ110514);重庆邮电大学计算机学院"云计算"专项项目(JK-Y-2010001)

作者简介: 袁正午(1968-),男,湖南人,教授,博士,CCF 高级会员,主要研究方向为 LBS、移动定位、射线跟踪、GIS 系统集成;王丹丹(1987-),女,河南人,硕士研究生,主要研究方向为定位、射线跟踪(494425724@qq.com).

邻接点性质,减少匹配计算量,找出合适 k 值,提高运算效率。

1 基本理论

1.1 Voronoi 图

Voronoi 图是计算几何的重要研究内容,它是 Delaunay 三角网的对偶,Voronoi 图用下面的数学定义可以进行精确描述[8]:给定平面上的点集 $P=\{p_1,p_2,\cdots p_n,\}$,由下述公式对平面进行分割:$V_n(p_i)=n\{p\mid d(p,p_i)<d(p,p_j)\}(i=1,2,\cdots,n)$($d$ 表示两点之间的欧式距离)所给出的对平面的分割,而所有以 $p_i(i=1,2,\cdots,n)$ 为生成元(或母点)的多边形的集合 $V=\{V(P_1),V(P_2),\cdots,V(P_n)\}$ 就构成了 P 的 Voronoi 图。整个平面被 n 个生长点划分为 n 个单元。其有如下性质[9]:a)势力范围特性,即每一个空间生长目标唯一地对应一个 Voronoi 多边形,对一个空间目标而言,凡是落在 Voronoi 多边形范围内的空间点均距其最近,此特性为研究最近搜索问题提供了有力手段;b)局域动态特性,即每一个 Voronoi 多边形的平均边数不超过 6,这表明删除或增加一个空间生长目标,一般只影响 6 个左右的相邻空间生长目标,换言之,对 Voronoi 图的修改只影响局部范围;c) Voronoi 图还具有线性特性、最近邻近特性等性质。

1.2 Voronoi 图的 k 级邻接生成点

给定一组生长点 $P=\{p_1,p_1,\cdots p_1,\}\subset R^2$ 生成的 Voronoi 图中,其中 $2<n<\infty$,且当 $i\neq j$ 时,$p_i\neq p_j$。其中 $i,j\in I_n=\{1,2,\cdots,n\}$。$p_i$ 的 k 级邻接生成点定义如下[10]:

a)1 级邻接生成点:

$AG_1(p_i)=\{p_i\mid VP(p_i)$ 和 $VP(p_j)$ 有公共边$\}$。

b)k($k\geqslant 2$)级邻接生成点:

$AG_k(p_i)=\{p_j\mid VP(p)$ 和 $VP(p_j)$ 有公共边,$pAG_{k-1}(p_i)\}$。

举例说明,例如在图 1 中 p_1 的 1 级邻接生成点为 p_2、p_4、p_5、p_6,2 级邻接生成点是 p_3 和 p_7。

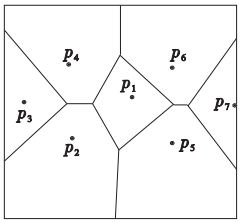

图1 Voronoi图

2 Voronoi 图在定位中的应用

2.1 基于 Voronoi 图分区的射线跟踪加速算法步骤

在进行射线跟踪的过程中,每条射线都要和所有物体进行求交运算,然后再对所得的交点进行排序,取最近交点作为实际相交物体。因此,若环境中有 n 个物体,计算复杂度都是 $O(n)$。然而,对于每一条射线,它实际上每次只与一个物体相交,与大多数物体根本不相交,即大多数的求交运算都是无效运算。因此,可以根据室内环境的特点和射线跟踪寻找有效交点的特点,对室内环境进行 Voronoi 图分区。

基于 Voronoi 图的射线跟踪加速算法步骤:a)以环境中的每个障碍物的几何中心为生长点建立 Voronoi 分区;b)确定有效交点。确定有效交点的关键是找出射线进入的 Voronoi 区域,本文根据 Voronoi 的势力范围特性,提出前进发射点的方法,来确定射线进入的 Voronoi 区域,如图 2 所示。

假设 a 区域有一条射线,首先射线要与此区域中的障碍物求交,若没有相交,则假设发射点沿着此射线的方向前进一定长度,此时会出现三种情况:

a)新的发射点仍在原来的 Voronoi 区域中。

b)新的发射点在相邻两个 Voronoi 区域的边界上。

c)新的发射点在相邻的 Voronoi 区域中。

要判断新发射点所处的 Voronoi 区域,就要分别求出此时发射点与原 Voronoi 区域生长点及其一级邻接生成点的距离,根据 Voronoi 图的势力范围特性,新发射点的位置与原 Voronoi 区域生长点及其一级邻接生成点的距离有三种:

a)新发射点距原生长点的距离最近,即发射点前进后,此发射点仍在原 Voronoi 区域内,由于已经知道射线与此 Voronoi 区域的障碍物不相交,因此继续让射线前进。

b)新发射点距原生长点的距离与原生长点某个一级邻接生长点的距离相同,即新发射点落在相邻的两个 Voronoi 区域的边上,此时无须作求交运算,直接让射线前进。

c)新发射点距原 Voronoi 区域的某个一级邻接生长点最近,即射线落在了以此点为生长点的 Voronoi 区域内,此时射线与新区域内的障碍物求交,若相交则找到有效交点,若不相交则继续让发射点前进,重复以上步骤,直至找到有效交点或者射线强度可以忽略不计为止。

2.2 基于 Voronoi 图一级邻接点的 K-近邻匹配算法

在线匹配阶段根据测得的待定位点的信号特征属性,与上一步用射线跟踪方法建立起来的位置—指纹数据库中的各元组进行匹配查询,传统的 K-近邻匹配算法需要遍历数据库中所有数据,找出与待定位点属性最接近的 k 个邻居,k 值过大或过小都会使定位产生一定误差。本文对传统的位置—指纹数据库进行改进,根据 Voronoi 图一级邻接点的特性,加入一级邻接点这一属性,新的位置—指纹数据库为参考点坐标、信号特征属性、参考点的一级邻接点。以图 3 为例建立的位置—指纹数据库如表 1 所示。

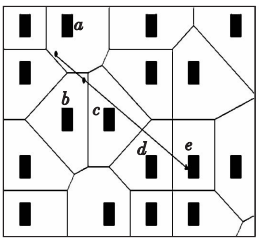

图2 Voronoi分区图

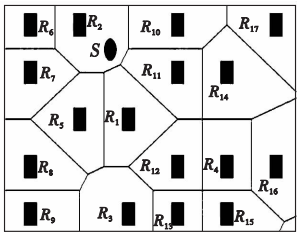

图3 Voronoi分区图

表 1 改进的位置—指纹数据库

参考点坐标	场强时延序列	一级邻接点
R_1	$E_1,\theta_1\cdots$	$R_2,R_3,R_5,R_{11},R_{12}$
R_2	$E_2,\theta_2\cdots$	$R_1,R_5,R_6,R_7,R_{10},R_{11}$
R_3	$E_3,\theta_3\cdots$	$R_1,R_5,R_8,R_9,R_{12},R_{13}$
⋮		
R_{17}	$E_{17},\theta_{17}\cdots$	R_{10},R_{14}

假设图 3 中 S 为待测点,计算 S 点的场强时延序列与数据库中各个参考点的相似性,假设 S:首先计算与 R_1 点的相似性,那么 S 与 R_1 的一级邻接点 R_2、R_3、R_5、R_{11}、R_{12} 就不需要再作相似性比较,再与其他的参考点作相似性计算,同样其他点的一级邻接点则不需要计算,直到所有点计算完毕,找出与待

测点 S 场强时延最相似的参考点为 R_1;其次 S 与 R_1 的一级邻接点作相似性比较,找出相似性最大的参考点,可发现是 R_2,那么 R_2 及它的一级邻接点就是找出的 K 个邻居。

2.3　基于 Voronoi 图分区的室内定位效果分析

在定位的离线阶段采用射线跟踪来模拟电磁波的信号传播过程,采集信号特征属性值,建立位置—指纹数据库。传统的分区加速算法都是规则分区,即每个分区都被划分为规则四边形,一个分区内可能包含一个或多个障碍物,也有可能一个分区中没有包含障碍物。传统分区加速算法同样需要确定射线所交的分区,再与分区中的障碍物求交,虽然不需要和所有障碍物求交,但是每划分一个分区,就多出四条边,求交运算仍然很多。

图 4、5 分别为传统的 1、2 级规则分区,图 6 为 Voronoi 图分区,在这些图中分别有两条射线,其中图 4 中的射线 1 和 2 要分别通过 44 次和 40 次求交运算找到有效交点;在图 5 中,虽然分区更细,和障碍物的求交次数减少,但是随着分区的增加,与分区边界的求交次数大量增加,此时射线 1 和 2 要分别通过 48 次和 36 次求交运算找到有效交点;在图 6 中,根据本文提出的算法,射线 1 和 2 只需进行 41 次和 34 次求交运算。这里只比较两条射线,在实际中,将会存在大量射线,运用本文提出的加速算法,计算效率将有很大提高。图 7 为相交结果对比图。

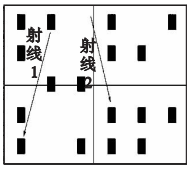

图4　一级规则分区

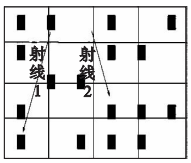

图5　二级规则分区

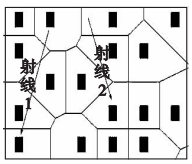

图6　Voronoi图分区

在定位的在线匹配阶段,传统的 K-近邻匹配算法需要遍历数据库中的所有元组,求出与待定位点最相似的 k 个点,且 k 值固定,因此 k 的取值对定位的精度会产生很大影响。以图 3 为例,图中有 17 个参考点,在传统的位置—指纹数据库中,要找出待定位点 S,根据传统的 K-近邻匹配算法需要进行 17 次匹配计算,选出相似的 k 个点,根据新的位置—指纹数据库,待定位点 S 需要进行 12 次匹配计算就可以找出邻居点。当数据库存储大量数据时,可以减少大量计算。

3　仿真结果分析

为了验证上述方法的高效性,在离线采集数据阶段,本文选取图 4 ~ 6 中的两个位置作为基站 1 和 2,对 Voronoi 图分区及传统的规则分区的加速效果作比较(图 7)。

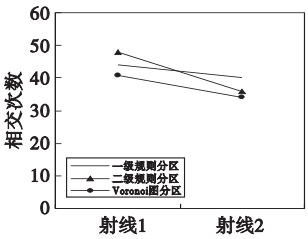

图7　相交结果对比

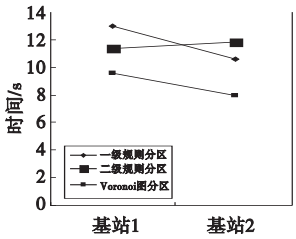

图8　仿真结果

1)规则分区方法的分区效果并不是仅和分区次数有关,还与建筑物数量、位置有很大的关系,并不是分区越细,计算效率越高,如射线 2 在一级规则分区的情况下要比二级规则分区快,因此传统的规则分区很难用一种自动化的方法一次性获得最优的效果。Voronoi 图分区只需建立一次分区就可以获得最优的加速效果,并且其最优的分区加速效果与建筑物数量和位置没有关系。

2)传统的规则分区需要用大量的求交运算来找到实际交点,而本文提出的 Voronoi 图分区则把大部分的求交运算变为求两点之间的距离运算,简化计算,提高运算效率。

在在线匹配定位阶段,以图 6 为实验环境图,通过使用 Voronoi 图分区的射线跟踪加速方法建立起位置—指纹数据库,分别用传统 K-近邻算法与本文改进的 K-近邻算法进行比较。表 2 即为实验后的结果对比。

表 2　结果对比

对比项	采用算法	
	传统 K-近邻法	本文算法
匹配个数	4 000	4 000
属性个数	3	3
匹配成功率/%	80.4	89.6
平均匹配时间/s	6.2	3.5

从表 2 可以看出,当匹配个数与匹配属性个数相同时,本文提出的算法在匹配速度方面有明显改善,且成功率较传统算法也有明显提高。这是因为建立的位置—指纹数据库利用了 Voronoi 图的一级邻接点,在进行匹配计算时并不像传统的 K-近邻算法一样盲目计算,而是边计算边筛选,逐步缩小范围,减少计算量,且 k 值的选取更加合理,能够尽可能地得到待定位点的邻居节点。

4　结束语

本文提出了一种新的基于 Voronoi 图的室内定位新方法,将 Voronoi 图与射线跟踪有效结合起来,在定位的离线阶段利用 Voronoi 图分区对射线跟踪进行加速,在建立位置—指纹数据库时,加入参考点的一级邻接点属性,再使用 K-近邻法进行匹配定位,k 值的选择更加合理。与传统算法相比,本文提出的方法使定位更加高效。

参考文献:

[1]　袁正午. 移动通信系统终端射线跟踪定位理论与方法[M]. 北京: 电子工业出版社,2007.

[2]　袁正午,贾媚媚. 一种改进的射线跟踪定位算法[J]. 计算机应用研究,2012,29(6):2129-2131.

[3]　袁正午,赵瑞静,朱智慧. 室内射线跟踪定位方法研究[J]. 计算机应用研究,2009,26(4):1299-1301.

[4]　季忠,黎滨洪,王豪行,等. 提高射线跟踪运算效率的一种方法[J],电波科学学报,1999,14(4):457-461.

[5]　周力,柴舜连,毛钧杰. 基于三维的射线跟踪八叉树算法的城市微区电波传播预测算法模型[J]. 电子学报,2002,30(12):1776-1778.

[6]　唐文胜,李娜,匡旺秋. RF 室内定位指纹库空间相关生成算法[J]. 计算机工程与应用,2008,44(23):226-229.

[7]　汤丽,徐玉滨,周牧,等. 基于 K-近邻算法的 WLAN 室内定位技术研究[J]. 计算机科学,2009,23(4B):54-55.

[8]　AURENHAMMER F. Voronoi diagrams-a survey of a fundamental geometric datastructure[J]. ACM Computing Surveys,1991,23(3):345-405.

[9]　孙东璞,郝忠孝. 基于 Voronoi 图的组最近邻查询[J]. 计算机研究与发展,2010,47(7):1244-1251.

[10]　王森. 基于 Voronoi 图的最近邻查询的研究[J]. 微计算机信息,2008,24(11-3):259-260.