

一种基于坐标和的保护位置隐私近邻查询方法

胡 磊 王佳俊 倪巍伟

(东南大学计算机科学与工程学院 南京 211189)

摘 要 空间定位和无线通信技术的成熟促进了基于位置服务(Location Based Service, LBS)的发展,用户通过向 LBS 服务器发送位置和查询信息获取相应服务。这种模式不可避免地带来对用户个体隐私的侵犯。随着用户对个体隐私信息安全的日益关注,如何在保护用户位置隐私安全下提供基于位置的查询服务成为研究的热点。现有的基于可信第三方的方法主要存在以下问题:(1)难以寻找满足要求的可信第三方;(2)可信第三方容易成为系统的瓶颈,造成系统查询效率和扩展性较差。针对这些问题,提出一种不依赖于可信第三方的隐私保护查询策略,即客户端通过向 LBS 服务提供方发送其当前位置的二维坐标之和,实现对查询发起用户位置隐私的保护。LBS 服务器通过设置基于坐标和的查询处理策略将包含查询结果的候选解反馈给客户端,进一步通过对候选解的有效剪枝,有效降低通信开销以及服务器与客户端的处理代价。理论分析和实验结果表明,算法是可行的,能够有效解决依赖于可信第三方的系统带来的查询效率和系统扩展性较差的问题。

关键词 隐私保护,坐标和,位置隐私,基于位置服务

中图法分类号 TP392 **文献标识码** A

Location Privacy Preserving Nearest Neighbor Querying Based on Coordinates Accumulation

HU Lei WANG Jia-jun NI Wei-wei

(School of Computer Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract With the development of spatial positioning and wireless communication technology, location based services have been promoted greatly. Users can get services by sending their position information to LBS server. But in this manner, it is inevitable to disclosure users' locations. With witnessed concerning on privacy preservation of individuals, it becomes pressing to provide location based query services without compromising users' location privacy. Most of existing solutions adopt a framework of trusted third parties(TTPs) to serve as intermediary between user clients and LBS server. These solutions suffer from the following issues;(1) Trusted third party is difficult to find, (2) TTP is inclined to be the system's bottleneck. Hence, it results in poor query efficiency and scalability. This paper proposed a TTP-free based method that submits coordinates accumulation instead of the user's real location. The client submits the query with coordinate accumulation of his location to the server. Special coordinate accumulation based query process is devised at the server side, which can generate candidate answers including the just query result. Further, an effective pruning strategy is applied to improve communication cost and workload at both client and server sides. Theoretical analysis and experimental results demonstrate that our method can solve the problems mentioned earlier effectively.

Keywords Privacy preserving, Coordinates accumulation, Location privacy, Location based service

近年来,无线通信和空间定位技术的发展促进了基于位置信息服务(Location Based Services, LBS)的出现,用户通过向服务提供方共享自身位置信息获取相应的服务,关于用户当前位置的近邻查询以其应用基础性和普遍性得到了广泛的关注。这种用户发送当前位置给服务提供方的模式,不可避免地造成用户位置信息泄露。随着用户对个体信息隐私安全的日益关注,如何在保护查询发起用户位置隐私安全的同时提供 LBS 近邻查询服务成为数据库与信息安全领域的研究热点。

针对位置服务中的隐私保护问题,文献[1-3]提出了基于可信第三方的隐私保护方法,即用户将其准确位置信息发送给可信第三方,借助可信第三方与服务提供方交互,从而实现保护位置隐私安全与享受服务的兼顾。但基于可信第三方的方法存在以下问题:(1)存在性问题,即现实世界很难找到所有用户都信任的第三方;(2)容易成为系统的瓶颈,可信第三方位于客户端和 LBS 服务器之间,承担中转处理任务,大量的用户将其精确位置和查询信息提交给可信第三方,可信第三方要根据用户的隐私需求产生相应匿名域,匿名域的产生

到稿日期:2011-09-04 返修日期:2011-11-23 本文受国家自然科学基金(61003057,60973023)资助。

胡 磊(1989-),男,硕士生,主要研究领域为数据挖掘和数据隐私安全保护,E-mail:hulei@seu.edu.cn;王佳俊(1987-),男,硕士生,主要研究领域为数据挖掘和数据安全隐私保护;倪巍伟(1979-),男,副教授,硕士生导师,主要研究领域为数据挖掘、数据隐私安全保护和非结构化数据管理。

需要相应的计算资源和服务时延,这将带来查询效率降低和系统扩展性差的隐患。

针对这些问题,本文提出了一种不依赖于可信第三方的保护位置隐私近邻查询方法 CANNQ(Coordinates Accumulation Nearest Neighbor Querying),即采用客户端与服务器共享位置坐标和的方式,通过在 LBS 服务器端设置特殊的查询处理程序,实现客户端与服务器端的直接通信,以解决系统查询性能和扩展性较差的问题。

本文第 1 节简单概述基于位置服务的研究现状;第 2 节介绍 CANNQ 的客户端处理算法;第 3 节对 CANNQ 的服务器端查询处理方法和剪枝策略进行介绍和分析;第 4 节对 CANNQ 方法的有效性进行实验验证,并将其与已有方法进行性能对比;最后总结全文并对下一步工作进行展望。

1 相关工作

位置服务中的隐私保护研究从保护对象角度可以分为保护查询发起者位置隐私和保护查询内容隐私两种,本文主要针对位置隐私的保护。从是否需要可信第三方角度,可以将保护位置隐私 LBS 查询研究分为基于可信第三方模式(Trusted Third Party, TTP)和不依赖可信第三方模式(Trusted Third Party Free, TTP-free)^[4],两种模式架构如图 1 所示。基于可信第三方模式,客户端将精确的位置信息和查询内容发送给可信第三方,由可信第三方来隐藏位置信息并与服务提供方交互获得查询结果,再进行筛选后将查询结果返回给客户。而在无可信第三方模式下,客户端与服务器间通过建立安全通信机制实现直接通信,并完成查询。

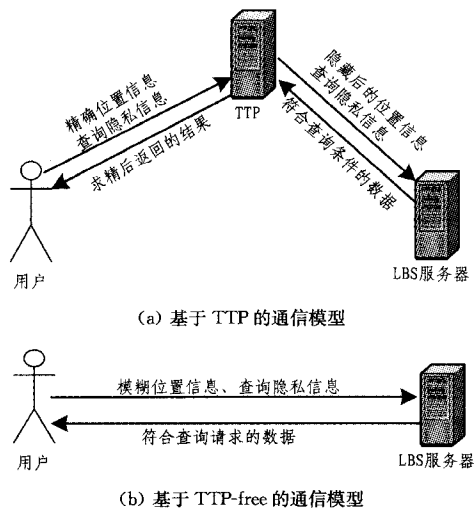


图 1 基于 TTP 和 TTP-free 的两种模型

近年来,基于可信第三方的保护位置隐私查询研究得到了长足的进展。文献[1]提出了一种基于 K 匿名模型的 LBS 隐私保护方法,使攻击者在 K 个无差别的位置中无法区分出客户的真实位置;文献[2]采取允许客户定义 K 值以及可接受的最大延迟时间和位置扰动范围的方法,即对查询系统性加以改进;文献[3]提出了一种基于隐私网格的方法,即利用网格更有效地实现匿名;不依赖可信第三方的保护位置隐私查询方面,文献[6]首次提出了一种基于协作的位置隐私保护算法,即每个客户在其位置信息中加入零均值的高斯噪声并广播,同时接收其邻居发送的位置信息,从中选择 $K-1$ 个

邻居组成包括自身在内的 K 个位置集合,确定集合中心并发送给服务器;文献[7]提出了利用其他用户位置信息来产生伪装区域的基于协作的隐私保护方法,其缺陷是每个客户必须彼此信任,该要求在现实应用中比较苛刻;文献[8]提出了一种基于假位置的保护位置隐私近邻查询方法,即客户端向服务器提交假位置,服务器端返回关于假位置的查询结果,重复这一过程,直到返回的查询结果满足用户查询准确性要求;文献[9]中提出了一种基于隐秘信息获取(Private Information Retrieval, PIR)的保护位置隐私近邻查询方法。

2 CANNQ 的客户端算法

为了确保查询用户位置的安全,客户端不能将位置信息直接提供给服务提供方,需要对查询用户的位置进行隐藏处理,同时要求服务器端能够根据隐藏后的位置信息将准确的查询结果提供给用户。本文采用查询用户发送器位置坐标和的方法,避免直接提交查询用户位置信息。

定义 1(坐标 c 值) 设一个位置的二维坐标为 (x, y) , 将其累加起来,记和为 c ,即 $c=x+y$ 。

定义 2(坐标 x 的泛化区间) 根据客户端精确位置 x 坐标,随机产生一个 x 的泛化区间 $[a, b]$,且 $x \in [a, b]$ 。

为了隐藏客户的精确位置坐标,CANNQ 将位置坐标 c 值和坐标 x 的泛化区间提交给服务器,结合客户的查询内容描述 *description*,客户端发送的查询请求可表示为 $Query(c, [a, b], description)$ 。客户端实际发送的是一条线段,其方程为 $c=X+Y, X \in [a, b]$,该线段的长度 $L=\sqrt{2}(b-a)$ 。线段上的任意一点都有可能是用户的真实位置,因此攻击者无法确定客户的具体位置,这就达到了保护用户真实位置的目的。其位置隐私的保护程度取决于线段 L 的大小, L 越大其隐私度越好;反之,隐私度越差。

客户端算法描述如下:

算法 1

输入:线段的长度 L ,客户真实的坐标 (x, y) ,查询描述 *description*

输出:查询请求 $Query(c, [a, b], description)$

- (1) Calculate c value that $c=x+y$;
- (2) Generate $[a, b]$ randomly, satisfying $x \in [a, b]$ and $L=\sqrt{2}(b-a)$;
- (3) Return $Query(c, [a, b], description)$ 。

3 CANNQ 的服务器算法

3.1 服务器基本算法

服务器端存储查询对象 POI(Point Of Interest)信息,例如某区域内所有加油站的二维地址坐标。客户端仅提交其坐标和信息,在服务器端对所有的 POI 点做同样的处理,计算所有 POI 的 c 值,然后将其存储在 B^+ 树中。如图 2 所示,该 B^+ 树的叶子结点内存储信息的结构为 $(c_{POI}, \langle x_{POI}, y_{POI} \rangle)$,其中 $c_{POI}=x_{POI}+y_{POI}$ 。

定义 3(两坐标 c 值的邻近系数 σ) 设任意两个坐标分别为 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) ,其坐标 c 值分别记为 c_1 和 c_2 ,且 $c_1=x_1+y_1, c_2=x_2+y_2$,定义这两个坐标 c 值的邻近系数为 $|c_1-c_2| \leq \sigma$,其中 $\sigma \geq 0$ 。

定义 4(线段 AB 最近邻 $NN(AB)$) 设一个点 M 的最近邻为 $NN(M)$,则 $NN(AB)=\{NN(M) | M \in AB\}$ 。

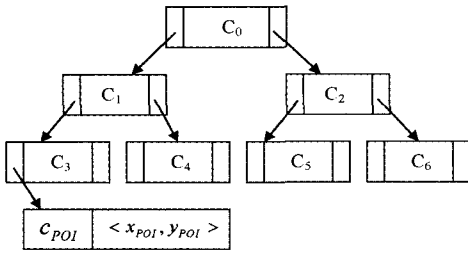


图2 B⁺树的结构

以查询用户发起最近邻查询请求为例,介绍 CANNQ 的服务器查询过程。在服务器端接收到客户端的查询请求 $Query(c, [a, b], description)$ 后,根据客户端发送来的坐标 c 值和 x 的区间范围 $[a, b]$,作出如图 3 所示的线段,记该线段为 AB 。在服务器端 B^+ 树中查找其 c_{POI} 值与 c 值不大于 σ 的 POI 集合(即满足 $|c - c_{POI}| \leq \sigma$)。从中选取某个 POI,记为 P 点,其坐标为 (x_P, y_P) 。连接 P 与线段 AB 两端点,假设线段 PA 和 PB 的长度分别为 l_{PA} 和 l_{PB} ,取 $l_{max} = \max(l_{PA}, l_{PB})$ 。可以得到查询区间 $[c - l_{max}, c + l_{max}]$,如图 3 中的五边形 $CDEF$ (记作 $\triangle CDEF$)。

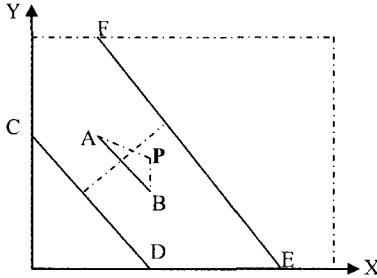


图3 基本服务器算法候选结果

性质 1 对于平面上任意点 M ,若 $M \in NN(AB)$,则 $M \in \triangle CDEF$ 。

证明:考虑两种情况,即 $\triangle CDEF$ 区域仅包括 P 一个点与 $\triangle CDEF$ 区域除包括 P 点外,还包含其他点。对于第一种情况,显然有 $NN(AB) = \{P\}$,且 $P \in \triangle CDEF$;对于第二种情况,假设 $\exists T \in AB, NN(T) = \{Q\}$,但 $Q \notin \triangle CDEF$,则 $Q \in NN(AB)$,且点 Q 与 AB 的最近距离必然大于 l_{max} 。由于 $P \in \triangle CDEF$ 且 P 点离 AB 的最大距离为 l_{max} ,因此 P 点与 T 点的距离一定小于等于 l_{max} ,从而得出 $Q \notin NN(T)$ 且 $Q \notin NN(AB)$,与假设矛盾。证毕。

因此,利用坐标 c 值区间 $[c - l_{max}, c + l_{max}]$ 在 B^+ 树中做范围查询,必然能找到线段 AB 的最近邻 $NN(AB)$ 。由于用户位置是线段 AB 上的一点,因此所要查询的最近邻必定在 $NN(AB)$ 中。

3.2 P 点的选择

由服务器端处理流程可知, P 点的选择关系到查询中间结果规模。中间结果规模直接影响服务器和客户端的处理开销和通信开销,本节对 P 点的选取问题进行分析。

由图 3 易得, P 点到线段 AB 两端点中的距离的最大值为 l_{max} ,当 P 为线段 AB 中的点时, l_{max} 取得最小值,即 $l_{max} = \sqrt{2}(b-a)/2$ 。因此, P 点的选择要尽可能地趋近于 $\sqrt{2}(b-a)/2$,定义一个距离差值参数 ϵ ,要求 $l_{max} - \sqrt{2}(b-a)/2 \leq \epsilon$,以保

证查询区间 $[c - l_{max}, c + l_{max}]$ 足够小,服务器端产生的候选结果集规模也足够小,进而减少通信开销和客户端处理开销。在服务器端 B^+ 树中查找满足邻近系数 $|c - c_{POI}| \leq \sigma$ 约束和 $l_{max} - \sqrt{2}(b-a)/2 \leq \epsilon$ 约束的 POI 作为 P 点。

3.3 中间结果的筛选与复杂度分析

如图 3 所示,返回中间结果的范围位于 $\triangle CDEF$ 内。直观上, $\triangle CDEF$ 的面积越大,其返回的中间结果规模越大。通过选择合适的 P 点可以减小 $\triangle CDEF$ 的面积,但 $\triangle CDEF$ 内依然包含很多的冗余点,因此有必要进一步减小 $\triangle CDEF$ 的面积,尽可能筛减冗余点。

如图 4 所示,分别以 A 和 B 为圆心、以 l_{PA} 和 l_{PB} 为半径,画两个圆,记为 C_A 和 C_B 。

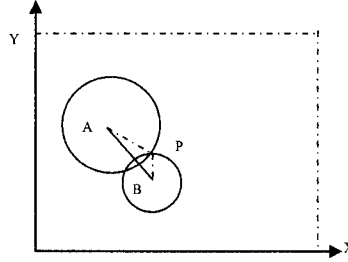


图4 准确候选结果集

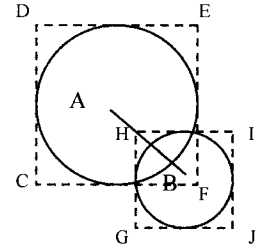


图5 近似候选结果集

性质 2 若点 $M \in NN(AB)$,则 $M \in C_A \cup C_B$ 。

证明(反证法):假设存在一点 $T, T \in \{AB \text{ 被 } C_A \text{ 所截的部分}\}$,且 $NN(T) = \{Q\}$, Q 为地图上一点,但 $Q \notin C_A$,那么 Q 点与 T 点的距离 l_{QT} 满足: $l_{QT} > l_{PA}$ 且 $l_{QT} > l_{PB}$ 。得出 $Q \notin NN(T)$,且 $Q \notin NN(AB)$,与假设矛盾。

同理可证, $T \in \{AB \text{ 被 } C_B \text{ 所截的部分}\}, Q \notin NN(T)$,且 $Q \notin NN(AB)$ 。证毕。

由上述分析可知,不属于 $C_A \cup C_B$ 区域内的 POI 点一定为冗余点,应予以剪枝。图 5 示出 C_A 的外接正方形 $CDEF$ 和 C_B 的外接正方形 $GHIJ$ 。为简化计算,用圆的外接正方形来代替圆进行剪枝处理。正方形 $CDEF$ 对应区域可表示为:

$$\{(x, y) | x \in [a - l_{PA}, a + l_{PA}], y \in [c - a - l_{PA}, c - a + l_{PA}]\}$$

正方形 $GHIJ$ 对应区域为:

$$\{(x, y) | x \in [b - l_{PB}, b + l_{PB}], y \in [c - b - l_{PB}, c - b + l_{PB}]\}$$

在 B^+ 树中进行范围查询时,到达叶子结点取出候选 POI 的坐标与正方形区域进行比较,即可判断其是否应保留作为中间结果。

服务器端算法描述如下:

算法 2

输入:查询请求 $Query(c, [a, b], description), \epsilon, \sigma, B^+$ Tree

输出:返回 POI 结果集 V

- (1) $Qset = \Phi$; /* 初始化候选 P 点集合 Qset 为空 */
- (2) get POI set Qset by making range query within $[c - \sigma, c + \sigma]$
/* 在 B^+ 树上进行范围查询 */
- (3) for each point $p \in Qset$
- (4) calculate distance l_{pA}, l_{pB} ;
- (5) get $l_{max} = \max(l_{pA}, l_{pB})$;
- (6) if $l_{max} - \sqrt{2}(b-a)/2 \leq \epsilon$

```

(7) mark the p as P; /* 标志为 P 点 */
(8) break;
(9) endif
(10) endfor
(11) for each POI(x,y) at leaf node within range [c-lmax, c+lmax]do
(12) if(x,y) in
    {(x,y) | x∈[a-lPA, a+lPA], y∈[c-a-lPA, c-a+lPA]}
    or(x,y) in
    {(x,y) | x∈[b-lPB, b+lPB], y∈[c-b-lPB, c-b+lPB]}
(14) insert(x,y) into V, do next;
/* 若在区域内,则加入到结果集 V 中 */
(14) endif
(15) endfor
(16) return V;

```

假设服务器端的 POI 总数为 N , 则服务器端预存的 B^+ 树的高度为 $\log_2 N$. 若找到 R 个候选 P 点, 则其时间复杂度为 $O(\log_2 N + R/2)$, 一般 R 很小, 可忽略不记, 寻找 P 点的时间复杂度为 $O(\log_2 N)$. 在进行范围查询时, 搜索区间下界的时间复杂度为 $O(\log_2 N)$. 设在坐标 c 值区间 $[c-l_{\max}, c+l_{\max}]$ 内的 POI 个数为 M , 在 B^+ 树的叶子结点中是按坐标 c 值升序排列的, 则依次访问 M 个结点的时间复杂度为 $O(M)$, 即范围查询时间复杂度为 $O(\log_2 N + M)$, 总的时间复杂度为 $O(\log_2 N + M)$.

3.4 关于 KNN 查询

上面所述的最近邻算法思想, 同样可以应用于 KNN 查询. 区别在于最近邻查询时选择的是 1 个 P 点, KNN 查询时需要选择 K 个 P 点, 然后从 $2K$ 个距离中选取离线段两端点最大的距离, 作为 l_{\max} 进行范围查询. 在返回结果的筛选过程中, 由于选取了 K 个 P 点, 每个 P 点产生 2 个圆的外接正方形, 因此近似的 KNN 候选结果集是 $2K$ 个圆外接正方形的并集. 但这个并集区域依然可以用两个或若干个不等式表示, 其情况依然是可以判断的, 从而可以减少返回结果集的大小.

4 实验结果与分析

本节对 CANNQ 算法的有效性进行验证. 首先通过 CANNQ 中参数的实验效果来验证该方法的实际可行性, 包括客户端和服务端的时间以及通信量的大小; 然后在不同规模数据集上与 Casper^[10]、GST^[8] 方法进行对比.

实验数据来源于实际数据集 NE 和数据产生器 Spatial Data Generator 随机产生的数据集, 将实验数据规格化为 $[0, 1]$ 之间的二维数据. 实验所用的机器配置为: Intel(R) Pentium (R) 4 CPU 2.4GHZ, 1.00GB 内存. 在服务器端, 采用 B^+ 树索引, 其块的大小为 1kB 字节. 图 6—图 8 分别示出参数 ClientL (用户发送线段长度)、NeighborValue (邻近系数) 及 Distance (距离差值) 对客户端、服务器端计算开销及通信量的影响.

由图 6 可以看出, 随着用户隐私程度的增强, 客户端、服务器端的时间消耗以及通信量呈增大趋势. 由图 7 可知, 随着 NeighborValue 值的增加, 客户端、服务器端的时间消耗以及通信量呈减小趋势, 渐趋于稳定, 因此选择较小的 NeighborValue, 有助于减少服务器端查询开销. 图 8 也示出 Dis-

tance 参数对查询性能的影响, 当 Distance 较小时, P 点选择将会变得很不容易, 所以服务器端时间代价较高; 随着 Distance 逐渐增大, P 点选取的难度降低, 服务器端时间代价就会骤降, 但当 Distance 超过一定的上界后, 由于扩大了查询的范围, 服务器端代价又会随之上升, 通信开销也会随之增大.

图 9 对 CANNQ 算法、Casper 算法以及同样不依赖于可信第三方的 GST 算法进行对比分析, CANNQ 方法在不同规模数据集上的服务器端时间代价均要远少于 Casper 和 GST, 表明 CANNQ 算法在服务器端单位时间内能处理较多的查询请求, 体现了良好的可扩展性. CANNQ 算法客户端时间消耗介于 Casper 和 GST 算法之间, 受数据集规模影响不明显. 在通信开销方面, 随着数据集的增大, CANNQ 的通信开销要大于 Casper 和 GST 方法.

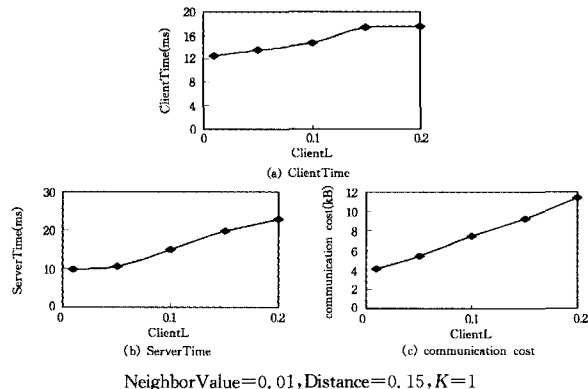


图 6 根据 ClientL 参数不同设置, CANNQ 的实验结果

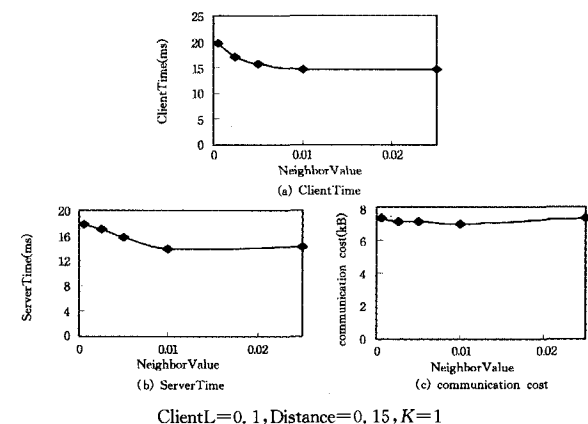


图 7 根据 NeighborValue 参数不同设置, CANNQ 的实验结果

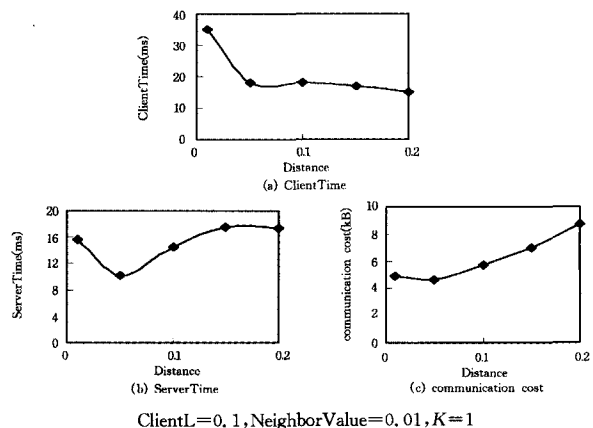
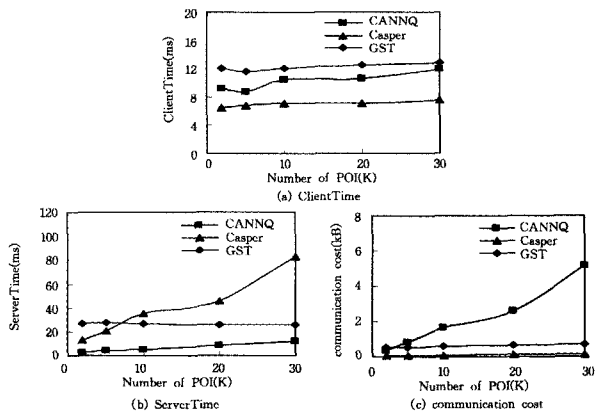


图 8 根据 Distance 参数的不同设置, CANNQ 的实验结果



CANNQ; ClientL=0.01, NeighborValue=0.002, Distance=0.05,
 K=1; Casper; K=1, Amin=0.000317; GST; K=1, dist(q, q')=0.0178

图9 CANNQ与基于TTP方法Casper、基于TTP-free方法GST对比实验结果

结束语 针对现有的基于可信第三方的保护位置隐私近邻查询方法存在的不足,难以寻找满足要求的可信第三方,可信第三方容易成为系统的瓶颈而造成系统查询效率和扩展性较差,本文提出一种不依赖可信第三方的基于坐标和的保护位置隐私查询方法CANNQ。客户端通过向LBS服务提供方发送其当前位置的二维坐标之和,实现对查询发起用户位置隐私的保护;LBS服务器通过设置基于坐标和的查询处理策略将包含查询结果的候选解反馈给客户端,进一步通过对候选解的有效剪枝,有效降低了通信和客户端的处理代价。下一步,就如何减少CANNQ方法的通信量做出改进,使之更加有效。

参考文献

[1] Gedik B, Liu L. Protecting location privacy with personalized k-anonymity: Architecture and algorithms[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2008, 7(1): 1-18

[2] Gedik B, Liu L. A customizable k-anonymity model for protecting location privacy[C]//Proceedings of the IEEE International

conference on Distributed Computing Systems(ICDS'05). 2005; 620-629

[3] Bamba B, Liu L, Pesti P, et al. Supporting anonymous location queries in mobile environments with privacy grid[C]//International World Wide Web Conference WWW. 2008; 237-246

[4] Solanas A, Domingo-Ferrer J, Martinez-Ballester A. Location privacy in location-based services: Beyond TTP-based schemes[C]//Proc. 1st Int. Workshop PiLBA. 2008; 12

[5] Rohunen A, Markkula J. Approaches to Privacy Protection in Location-Based Services[C]//NDT 2010, part I, CCIS 87. 2010; 402-409

[6] Domingo-Ferrer J. Microaggregation for database and location privacy[C]//Etzion O, Kuflik T, Motro A. eds. Next Generation Information Technologies and Systems-NGITS. Volume 4032 of LNCS, Berlin/Heidelberg, Springer, 2006; 106-116

[7] Chow C, Mokbel M F, Liu X. A peer-to-peer spatial cloaking algorithm for anonymous location-based services[C]//Proceedings of the 14th Annual(GIS'06). 2006; 171-178

[8] Yiu M L, Jensen C S, Huang X, et al. Spacetwist: Managing the trade-offs among location privacy, query performance, and query accuracy in mobile services[C]//IEEE 24th International Conference on Data Engineering ICDE'08. 2008; 366-375

[9] Ghinita G, Kalnis P, Khoshgozaran A, et al. Private queries in location based services: Anonymizers are not necessary[C]//Proceedings of the 2008 ACM SIGMOD international conference on management of data(SIGMOD '08). Vancouver, BC, Canada, ACM, June 2008; 121-132

[10] Mokbel M F, Chow C-Y, Aref W G. The new Casper: query processing for location services without compromising privacy[C]//Proceedings of the 32nd international conference on Very Large Data Bases. Seoul, Korea, September 2006; 12-15

[11] 潘晓, 肖珍, 孟小峰. 位置隐私研究综述[J]. 计算机科学与探索, 2007, 1(3): 268-281

[12] 魏琼, 卢炎生. 位置隐私保护技术研究进展[J]. 计算机科学, 2008, 35(9): 21-25

(上接第146页)

[24] Qiang Y, Kangheng W, Yunfei J. Learning action models from plan examples using weighted max-sat[J]. Artificial Intelligence, 2007(2/3): 107-143

[25] Eyal A. Learning partially observable deterministic action models[C]//Proceedings of the Nineteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence(IJCAI 2005). 2005; 1433-1439

[26] Dafna S, Allen C, Eyal A. Learning partially observable action models: Efficient algorithm[C]//Proceedings of the Twenty-First National Conference on Artificial Intelligence(AAAI 2006). 2006; 920-926

[27] Dafna S, Eyal A. Learning partially observable action schema [C]//Proceedings of the Twenty-First National Conference on

Artificial Intelligence(AAAI 2006). 2006; 913-919

[28] Megan N, Adam V, Eyal A. Reasoning about partially observed actions[C]//Proceedings of the Twenty-First National Conference on Artificial Intelligence(AAAI 2006). 2006; 888-893

[29] 赖志锋, 姜云飞. 智能规划中基于遗传算法的动作模型的学习[J]. 计算机学报, 2007, 30(6): 945-953

[30] Zhuo H H, Yang Q, Derek H H, et al. Learning complex action models with quantifiers and logical implications[J]. Artificial Intelligence, 2010, 147(18): 1540-1569

[31] Matthew R, Pedro D. Markov logic networks[M]. USA: Department of Computer Science and Engineering, University of Washington, 2004

[32] Stanley K, Parag S, Matthew R, et al. The Alchemy System for Relational AI[M]. University of Washington, Seattle, 2005