

Private Information Retrieval

胡瀚林

May 18, 2016

① 背景

② 守り方

③ 攻撃方

④ 参考文献

① 背景

② 守り方

③ 攻撃方

④ 参考文献

Private Information Retrieval



- Q : 検索質問
- $R(Q)$: 質問 Q の検索結果

Location vs Keyword

- Location
 - 地図
 - 乗換案内
 - 近くのレストラン
- Keyword
 - ウェブ検索
 - データベース検索
 - クラウドストア検索

AOL 事件

AOL 質問ログ

AnonID	Query	QueryTime	ItemRank	ClickURL
4417749	care packages	2006-03-02 09:19:32	10	http://booksforsoldiers.com
4417749	care packages	2006-03-02 09:19:32	9	http://www.brandonblog.com
4417749	movies for dogs	2006-03-02 09:24:14		
4417749	blue book	2006-03-03 11:48:52	1	http://www.kbb.com
4417749	best dog for older owner	2006-03-06 11:48:24	1	http://www.canismajor.com
4417749	best dog for older owner	2006-03-06 11:48:24	5	http://dogs.about.com

- 2006年8月4日、AOL(American OnLine)が650,000人以上のユーザーの匿名化された検索質問ログを研究目的でリリースした。

AOL 事件

AOL 質問ログ

AnonID	Query	QueryTime	ItemRank	ClickURL
4417749	care packages	2006-03-02 09:19:32	10	http://booksforsoldiers.com
4417749	care packages	2006-03-02 09:19:32	9	http://www.brandonblog.com
4417749	movies for dogs	2006-03-02 09:24:14		
4417749	blue book	2006-03-03 11:48:52	1	http://www.kbb.com
4417749	best dog for older owner	2006-03-06 11:48:24	1	http://www.canismajor.com
4417749	best dog for older owner	2006-03-06 11:48:24	5	http://dogs.about.com

- 2006 年 8 月 4 日、AOL(American OnLine) が 650,000 人以上のユーザーの匿名化された検索質問ログを研究目的でリリースした。
- 2006 年 8 月 9 日、ID 4417749 の名前、年齢、住所などが特定された。(AOL)

Location vs Keyword



猫 ? 犬

- 位置間の距離は簡単に計算できるが、単語間の距離は計算しにくい
- 単語の次元数が高い



猫 ?

- ノイズを加えにくい

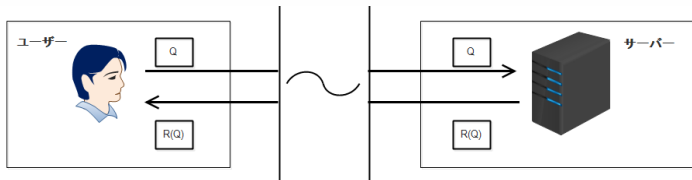
① 背景

② 守り方

③ 攻撃方

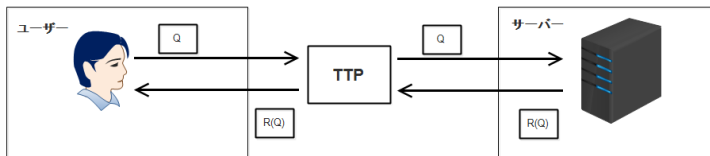
④ 参考文献

Anonymity



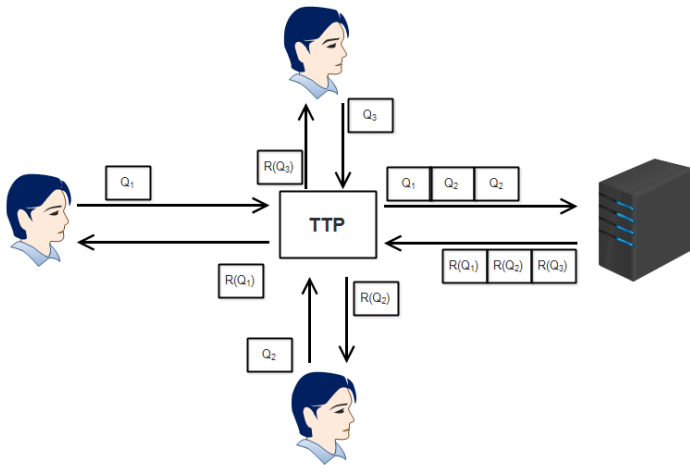
- 質問者を隠す

Tursted Third Party



- 質問者の IP アドレスなどを隠す

Tursted Third Party



- 複数の質問者を混ぜて検索する

Perturbation

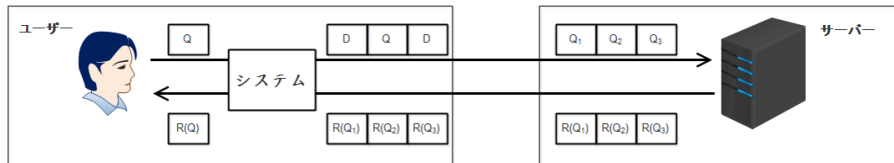
Location

- Geo-indistinguishability (ABCP13)

Keyword

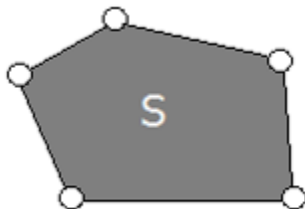
- 質問を一般化して検索する (AED12)
リンゴ ⇒ 赤 果物
- 事前に標準質問を作って、本当の質問の代わりに使う (MC09)

Obfuscation



- 複数の質問を混ぜて検索する

Obfuscation-Location



定義 $((k, s) - \text{privacy (LJY08)})$

本当の位置と $k - 1$ 個のダミー位置に囲まれた図形の面積が S 以上ある

Obfuscation-Keyword (BTD12)

問題

どのようなダミー質問がいいダミー質問

Obfuscation-Keyword (BTD12)

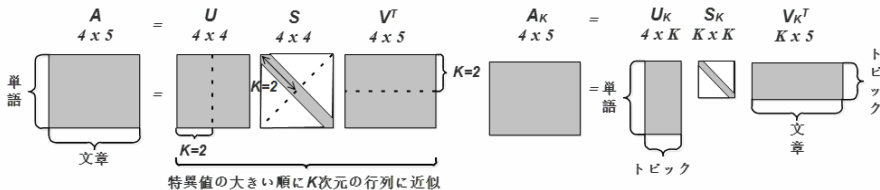
問題

どのようなダミー質問がいいダミー質問

Plausibly Deniable Search (MC09)

- 本当の質問との“ 距離 ”が遠い
- 本当の質問と似たような“ 確率 ”で提出される

Latent Semantic Analysis



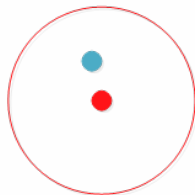
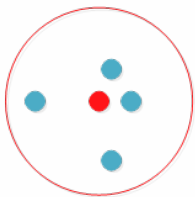
潜在的意味インデキシング

単語・文書行列 A を特異値分解 $A = USV^T$ し、 U 、 S 、 V の各列ベクトルを特異値が大きい順に K 個用いて A の低ランク近似 $A_K = U_K S_K V_K^T$ を得る。

このように低ランク分解によって、単語とトピックの関係を分析することができる

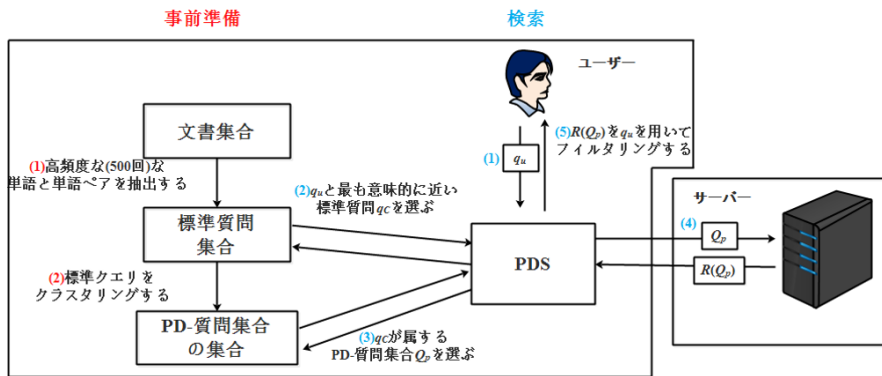
Plausibly

- 標準質問
- 質問ログ

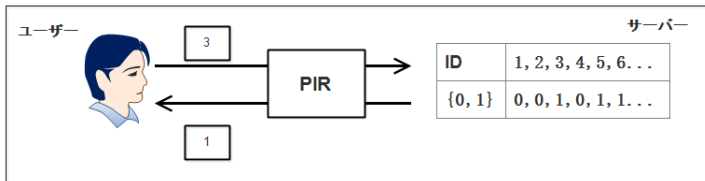


- 質問の近傍の中の質問数で“ 確率 ”、あるいは尤もらしさを計算する
- 質問数が多いほど“ 確率 ”が高いとする

Plausibly Deniable Search



PIR (OI07)



- 暗号などの手法を用いて質問の内容を完全に隠す

準同型暗号

定義 (準同型暗号)

二つの暗号文 $Enc(m_1), Enc(m_2)$ が与えられた時に、平文や秘密鍵なしで $Enc(m_1 \circ m_2)$ を計算できる暗号

例 (加算ができる準同型暗号)

$Enc(\cdot)$: 暗号化 $Dec(\cdot)$: 復号

$$Dec(Enc(m_1) \cdot Enc(m_2)) = m_1 + m_2$$

準同型暗号

ユーザー

質問生成

```
1: Input:  $i^*, n$ 
2: for  $i = 1, \dots, n$  :
3:   if  $i == i^*$  :
4:      $q_i = \text{Enc}(1)$ 
5:   else
6:      $q_i = \text{Enc}(0)$ 
7: return
    $Q = \{q_1, \dots, q_n\}$ 
```

復号

```
1: input:  $R$ 
2: return  $\text{Dec}(R)$ 
```

サーバー

結果計算

```
1: Input:  $Q, \{x_1, \dots, x_n\}$ 
2:  $R = 0$ 
3: for  $i = 1, \dots, n$  :
4:    $R = R \cdot q_i^{x_i}$ 
5: return  $R$ 
```

Note

$m_1 = m_2 \nRightarrow \text{Enc}(m_1) = \text{Enc}(m_2)$
 $\text{Dec}(R) = \sum_{x_i=1} \text{Dec}(q_i) = x_{i^*}$

PIR I

- 1995 Chor et al. : Multiserver PIR
 - 情報理論から見ると single-database PIR ができない
- 1997 Kushilevitz and Ostrovsky : computational single-database PIR
 - *quadratic residuosity computational assumption*
 - 通信量: $O(2^{\sqrt{\log n \log \log N}})$
- 1999 Cachin et al. : s-PIR
 - Φ – *hiding number – theoretic assumption*
 - 通信量: $O(\log^8 n)$
- 2000 Kushilevitz and Ostrovsky : Private Block Retrieval
 - *Naor – Yung one – way 2 – to – 1 trapdoor permutations*
 - *Goldreich – Levinhard – corepredicates*
 - 通信量: $n - cn/2k + O(k^2)$

PIR II

- 2005 Gentry and Ramzan : Multiserver PIR
 - Φ – *hiding number* – *theoretic assumption*
 - 通信量: $O(\log^2 n)$
- 2007 Aguilar-Melchor and Gaborit : computationally-efficient PIR
 - *lattice – based*
 - a few thousand bit-operations per bit in the database
 - 2010 Olumofin and Goldberg: 応答時間は普通の方法の千分の一くらい
- 2013 Yi et al. : PBR
 - *Fully homomorphic encryption*
 - 通信量: $(\gamma + \gamma/)$
 - 計算量: $(\gamma^2 + \gamma/2)$
 - 計算時間: 2min
 - 通信時間: 4.5s (100 – Mb/second)

Obfuscation + PIR

Embellishing Text Search Queries to Protect User Privacy (PDX10)

Bucket 37	...	Bucket 174	...	Bucket 879	...	Bucket 912
amaranthaceae osteosarcoma moustille hypocapnia		water accelerated active residual		soaked radiation dry nitrogen		tissues therapy yeast time

- 本当の質問との“ 距離 ”が遠い
- 本当の質問と似たような“ 確率 ”で提出される
- 質問ではなく単語ごとにダミーを加える

Wordnet

スクリーンショット

Synset 02068974-n ¹

Jpn: 海豚, ドルフィン, イルカ ²

Eng: *dolphin*

³ Jpn: くちばしのような鼻先を持つ様々な小型歯クジラ各種; ネズミイルカよりも大きい;
Eng: any of various small toothed whales with a beaklike snout; larger than porpoises;

Hype: [toothed whale](#)

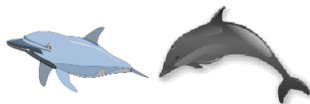
Hypo: [delphinus](#) [delphis](#) [white whale](#) [grampus](#) [griseus](#) [bottlenose dolphin](#)

[pilot whale](#) [sea wolf](#) [river dolphin](#) [porpoise](#)

Hmem: [delphinidae](#)

⁴

SUMO: c [AquaticMammal](#) ⁵



⁶

- ¹ synset番号(synset offset)
- ² 同義語(synonym)
- ³ 定義文・例文(gloss)
- ⁴ 関連synsetとのリンク
- ⁵ 他の言語資源とのリンク
- ⁶ 画像

- “ 距離 ”: 単語間の最小リンク数
- “ 確率 ”: 単語が属する synset のレベル

Obfuscation + PIR

amaranthaceae osteosarcoma moustille hypocapnia	water accelerated active residual	soaked radiation dry nitrogen	tissues therapy yeast time
---	---	---	--

$q = \{\langle \text{amaranthaceae}, E(0) \rangle, \langle \text{osteosarcoma}, E(1) \rangle, \dots\}$ t_i : 単語 i
 d_j : 文章 j L_i : t_i の検索結果 p_{ij} : d_j に対して t_i の score

Query processing by the search engine

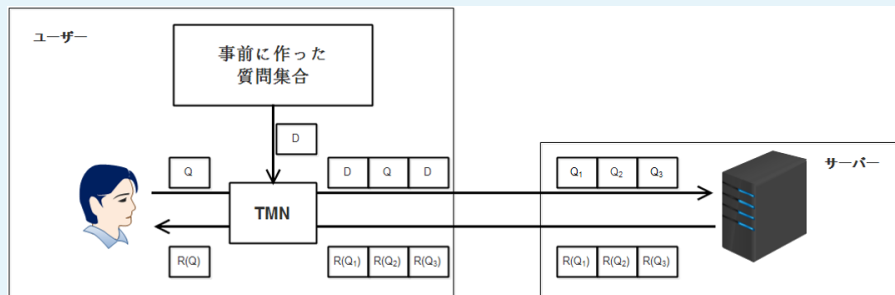
- 1: Input: Embellished query q
- 2: Let $R = \phi$
- 3: **for all** $\langle t_i, E(u_i) \rangle \in q$:
- 4: **for all** $\langle d_j, p_{ij} \rangle \in L_i$:
- 5: **if** $\exists \langle d_j, E(\text{score}_j) \rangle \in R$:
- 6: $E(\text{score}_j) = E(\text{score}_j) \cdot E(u_i)^{p_{ij}}$
- 7: **else**
- 8: Insert $\langle d_j, E(u_i)^{p_{ij}} \rangle$ into R
- 9: **return** R

Snapshot vs Sequence

Location

Snapshot vs Sequence

Keyword



TrackMeNot (HN09)

一つ一つの質問ではなく、ユーザーの質問ログにノイズを加える

Others

クラウドストア検索

- CryptDB (PRZB11)
 - ユーザーが自分が暗号化した、クラウド上のデータを暗号化したままで検索する方法

データベースの情報を守る

- Simulatable Auditing (KMN05)
 - ユーザーの差分質問からデータベース上の情報を守る

① 背景

② 守り方

③ 攻撃方

④ 参考文献

① 背景

② 守り方

③ 攻撃方

④ 参考文献

Bibliography I

Miguel E. Andrs, Nicols E. Bordenabe, Konstantinos Chatzikokolakis, and Catuscia Palamidessi.
Geo-indistinguishability: Differential Privacy for Location-based Systems.
In Proceedings of the 2013 ACM SIGSAC Conference on Computer & Communications Security, CCS '13, pages 901–914, New York, NY, USA, 2013. ACM.

Avi Arampatzis, Pavlos S. Efraimidis, and George Drosatos.
A query scrambler for search privacy on the internet.
Information Retrieval, 16(6):657–679, October 2012.

A Face Is Exposed for AOL Searcher No. 4417749 - New York Times.

E. Balsa, C. Troncoso, and C. Diaz.
OB-PWS: Obfuscation-Based Private Web Search.
In 2012 IEEE Symposium on Security and Privacy, pages 491–505, May 2012.

Daniel C. Howe and Helen Nissenbaum.
TrackMeNot: Resisting surveillance in web search.
Lessons from the Identity Trail: Anonymity, Privacy, and Identity in a Networked Society, 23:417–436, 2009.

Krishnaram Kenthapadi, Nina Mishra, and Kobbi Nissim.
Simulatable Auditing.
In Proceedings of the Twenty-fourth ACM SIGMOD-SIGACT-SIGART Symposium on Principles of Database Systems, PODS '05, pages 118–127, New York, NY, USA, 2005. ACM.

Bibliography II

Hua Lu, Christian S. Jensen, and Man Lung Yiu.

PAD: Privacy-area Aware, Dummy-based Location Privacy in Mobile Services.

In *Proceedings of the Seventh ACM International Workshop on Data Engineering for Wireless and Mobile Access*, MobiDE '08, pages 16–23, New York, NY, USA, 2008. ACM.

M. Murugesan and C. Clifton.

Providing Privacy through Plausibly Deniable Search.

In *Proceedings of the 2009 SIAM International Conference on Data Mining*, Proceedings, pages 768–779. Society for Industrial and Applied Mathematics, April 2009.

Rafail Ostrovsky and William E. Skeith Iii.

A Survey of Single-Database Private Information Retrieval: Techniques and Applications.

In Tatsuaki Okamoto and Xiaoyun Wang, editors, *Public Key Cryptography PKC 2007*, number 4450 in Lecture Notes in Computer Science, pages 393–411. Springer Berlin Heidelberg, April 2007.

DOI: 10.1007/978-3-540-71677-8_26.

HweeHwa Pang, Xuhua Ding, and Xiaokui Xiao.

Embellishing Text Search Queries to Protect User Privacy.

Proc. VLDB Endow., 3(1-2):598–607, September 2010.

Raluca Ada Popa, Catherine M. S. Redfield, Nikolai Zeldovich, and Hari Balakrishnan.

CryptDB: Protecting Confidentiality with Encrypted Query Processing.

In *Proceedings of the Twenty-Third ACM Symposium on Operating Systems Principles*, SOSP '11, pages 85–100, New York, NY, USA, 2011. ACM.