Efektivní vyhledávání ve vektorovém modelu DIS

Tomáš Skopal

katedra informatiky, FEI
VŠB-Technická univerzita Ostrava

Osnova

- Vektorové modely DIS - problém vyhledávání:
  - v klasickém vektorovém modelu
  - v LSI modelu
- Metrické indexování vektorových modelů
  - M-strom
  - přibližné semi-metrické dotazování
- Výsledky experimentů

Dokumentografické informační systémy

- Systémy pro správu a **vyhledávání** informací (zpravidla ve formě rozsáhlých kolekcí dokumentů)
- zejména textové kolekce, v poslední době multimediální databáze, XML, web, atd.
- vyhledávání v kolekci (databázi)
  - na shodu (exact-match search)
  - **podle podobnosti** (similarity search)
- modely DIS – booleovský, **vektorový**, pravděpodobnostní (a jejich modifikace)

Klasický vektorový model DIS (1)

- dokument D_i modelován vektorem d_i vah termů
- mnoho způsobů konstrukce vah – nejpopulárnější *tf*idf* (závislá na inverzní frekvenci termu v kolekci)
- kolekce reprezentována maticí termů-dokumentů
- řídká matice (max 1% hodnot nenulových)
  - používají se úsporné formáty uložení (např. CCS, CRS)
- vysoká dimenze (až stovky tisíc unikátních termů v kolekci)

Klasický vektorový model DIS (2)

- funkce podobnosti (kosinová míra) $\mathbf{SIM}_{cos}(q, d_j)$ klasifikuje podobnost vektoru dokumentu d_j k vektoru dotazu q – kosinus odchylky vektorů

$$\mathrm{SIM}_{cos}(q, d_j) = \frac{\sum_{k=1}^{n} q_k * w_{kj}}{\sqrt{(\sum_{k=1}^{n} q_k)^2 * (\sum_{k=1}^{n} w_{kj})^2}}$$

- dotazy (rozsahové a na *k* nejbližších sousedů) realizovány pomocí funkce podobnosti

Matice termů-dokumentů

document / term	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
database	0	0.48	0.05	0	0.70
vector	0.23	0	0.23	0	0
index	0.43	0	0	0	0
image	0	0	0.10	0	0.54
compression	0	0	0	0	0.21
multimedia	0.12	0.52	0.62	0	0
metric	0	0	0.32	0.40	0
space	0.42	0	0	0.24	0

Příklad matice termů-dokumentů

LSI model

- rozšíření klasického vektorového modelu o statistické předzpracování matice termů-dokumentů (singulárním rozkladem):

$$A = U\Sigma V^T$$

- výsledkem hustá matice konceptů-dokumentů
- báze konceptů – vektory konceptů jsou lineární kombinace termů a jsou uspořádány podle důležitosti (významná témata v kolekci)
- aproximace původní matice A rank-*k* SVD rozkladem :

$$A \approx U_k \Sigma_k V_k^T$$

- redukce dimenze (např. ze stovek tisíc termů na stovky konceptů)
- model LSI odhaluje latentní sémantiku – díky konceptům je vyhledávání méně závislé přímo na termech
  → LSI model (částečně) zachycuje **synonymii** a **homonymii**

Matice konceptů-dokumentů

document / concept \	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
$concept_1$	-0.21	0.48	-0.05	0.10	0.70
$concept_2$	0.23	0.20	-0.23	0.45	0
$concept_3$	-0.43	0.02	0.32	0.24	-0.06
$concept_4$	0.34	-0.01	0.10	0	0.54
$concept_5$	0.31	0.9	-0.78	0.52	0.21

Příklad matice konceptů-dokumentů

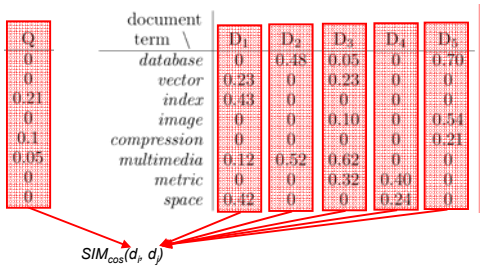
Problém vyhledávání ve vektorovém modelu

- matice velkého objemu (v řádu GB)
- neexistuje efektivní vyhledávácí metoda

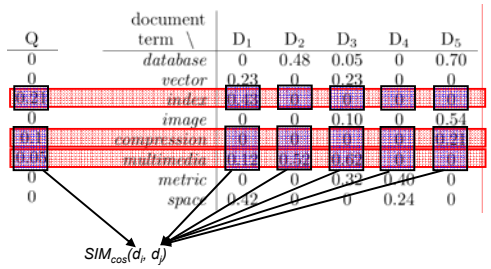
Naivní přístup:

- sekvenční čtení vektorů dokumentů
- pro řídké vektory dotazu je efektivnější čtení vektorů termů s nenulovými váhami v dotazu
  - méně efektivní pro husté vektory dotazu (dotaz dokumentem)
  - nepoužitelné pro LSI – každý vektor dotazu je hustý

Vyhledávání – čtení vektorů dokumentů



Vyhledávání – čtení vektorů termů



Metrické indexování

- vektory dokumentů = body ve vysokorozměrném prostoru
- problém je ekvivalentní vyhledávání ve vysokorozměrném prostoru na vzdálenost
- jako funkce vzdálenosti se používá **metrika *d***

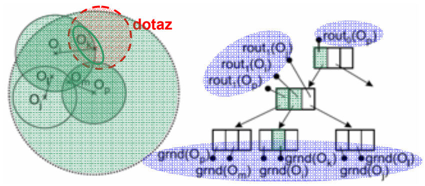
  Interpretace vzdálenosti jako podobnosti:
  čím menší vzdálenost objektů, tím vyšší míra podobnosti dokumentů

- dotaz reprezentován **regionem v metrickém prostoru**
  (např. rozsahový dotaz je hyper-koule definovaná středovým objektem a pokrývajícím poloměrem)

- axiom **trojúhelníkové nerovnosti** metriky dovoluje hierarchicky strukturovat celý prostor do nad- a podregionů

M-strom

- datová struktura pro hierarchické metrické indexování,
- vyvážený, stránkovaný strom (ala B^+-strom, R-strom, atd.)
- **směrovací objekty** ve vnitřních uzlech představují **metrické regiony**
- v listech uloženy indexované objekty
- trojúhelníková nerovnost → možnost vyloučení nerelevantních větví stromu (resp. regionů prostoru) v průběhu dotazu



(pro 2D prostor a L_2 metriku)

Metrické indexování ve vektorovém modelu DIS

- realizace efektivního vyhledávání pomocí metrického indexu
- indexují se vektory (pseudo-)dokumentů, tj. sloupce matice termů-dokumentů, resp. matice konceptů-dokumentů
- z kosinové míry $\mathbf{SIM}_{\mathbf{cos}}$ je odvozena **odchylková metrika** (deviation metric)

$$\mathbf{d}_{\mathbf{dev}}(v_i,v_j) = \arccos(\mathbf{SIM}_{\mathbf{cos}}(v_i,v_j))$$

- hierarchii M-stromu lze interpretovat jako hierarchii **shluků dokumentů**
- index M-stromu obsahuje pouze identifikátory objektů (sloupců) a tudíž je jeho velikost vzhledem k matici zanedbatelná (typicky do 2% velikosti matice)
- úspěšné pro LSI model (výrazné shluky – silně korelované souřadnice vektorů)

Vnitřní dimenze

- pro vysokorozměrná data klasického vektorového modelu je (přesné) vyhledávání neefektivní (databázový fenomén **prokletí dimenzionality**)
  - v M-stromu se prokletí dimenzionality projevuje velkými překryvy regionů, čímž vyhledávání degeneruje na sekvenční průchod
- velikost vnitřní dimenze (**intrinsic dimension**) datové sady (jedna z definic):

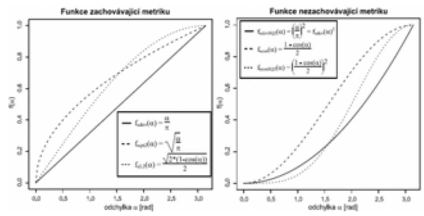
$$\rho = \frac{\mu^2}{2\sigma^2}$$

kde μ je střední hodnota a σ^2 je rozptyl vzdáleností (na histogramu vzdáleností datové sady)

- problém vnitřní dimenze je zobecněním problému prokletí dimenzionality – datová sada s vysokou vnitřní dimenzí je **málo strukturovaná** a vyhledávání v ní je neefektivní (resp. žádná ze současných metod není efektivní)
- snahou je **snížit velikost vnitřní dimenze**, tím zvýšit vnitřní strukturovanost datové sady → efektivní vyhledávání (i za cenu pouze přibližného výsledku)

Modifikace metriky (1)

- jednou z cest je použití vhodné **konvexní modifikace metriky**, ta zvýší rozptyl vzdáleností (a tím sníží velikost vnitřní dimenze)
- výsledkem je obecně semi-metrika (nesplňuje axiom trojúhelníkové nerovnosti)



konkávní modifikace (částečně) konvexní modifikace

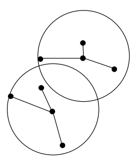
Modifikace metriky (2)

Histogramy vzdáleností na vektorech dimenze 240000

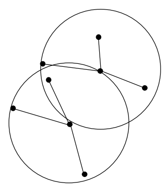
a) pro původní metriku ***d***

b) pro semi-metriku ***f(d)***, kde $f(x) = x^9$, tj. ***f(d)*** je konvexní modifikace ***d***

Modifikace metrik (3)

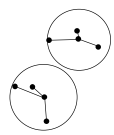


distribuce podle metriky ***d***



distribuce podle konkávní modifikace metriky ***d***

větší překryvy regionů



distribuce podle konvexní modifikace metriky ***d***

menší překryvy regionů (částečně narušena původní topologie)

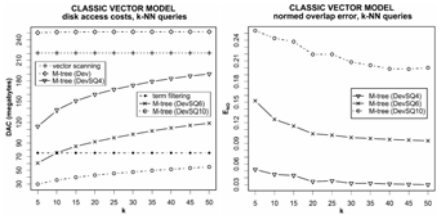
Semi-metrické dotazování

- využití konvexních modifikací metriky pro přibližné dotazování v M-stromu
- pro tvorbu M-stromu se standardně použije metrika ***d***
- modifikující funkce ***f*** se použije až při vyhodnocování dotazu, tj. ***f*** figuruje jako další parametr dotazu
  - rozšíření na *range*(*Q, r, f*) a *kNN*(*Q, k, f*)
- měření chyby ve výsledku dotazu pomocí *relativní přesnosti* odpovědi, chyba je pro „rozumné“ funkce *f* malá
- výhodou je dynamická volba funkce ***f***, a to jak pro každý dotaz, tak například i pro každou úroveň M-stromu, atd.

Metrické indexování ve vektorovém modelu DIS, experimenty (1)

TREC LATIMES - kolekce více než 130,000 novinových článků o více než 240,000 unikátních termech

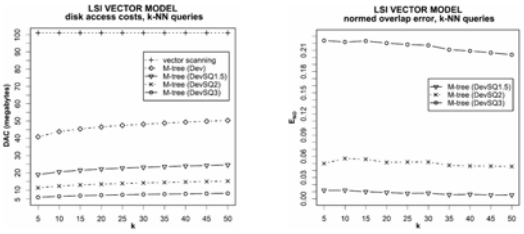
Klasický vektorový model



Metrické indexování ve vektorovém modelu DIS, experimenty (2)

LSI model

– původní dimenze 240000 redukovaná na 200



Reference

Skopal T., Krátký M., Snášel V.:
Efektivní implementace vektorového modelu pro dokumentografické informační systémy, **DATAKON 2003**, Brno.

Skopal T., Pokorný J., Krátký M., Snášel V.:
Revisiting M-tree Building Principles. **ADBIS 2003**, LNCS 2798, Springer-Verlag, Dresden, Germany

Skopal T., Moravec P., Krátký M., Snášel V., Pokorný J.:
An Efficient Implementation of the Vector Model in Information Retrieval. **RCDL 2003**, St.Petersburg, Russia

Skopal T., Krátký M., Snášel V.:
Metrické a semi-metrické indexování vektorových modelů pro dokumentografické informační systémy, **ZNALOSTI 2004**, Brno

Skopal T., Moravec P., Pokorný J., Snášel V.:
Metric Indexing for the Vector Model in Text Retrieval, submitted to **ACM SIGIR 2004**, Sheffield, UK

Skopal T.:
Pivoting M-tree: A Metric Access Method for Efficient Similarity Search, **DATESO 2004**, Desná