

VILNIAUS UNIVERSITETAS
MATEMATIKOS IR INFORMATIKOS FAKULTETAS
INFORMATIKOS KATEDRA

Biografinių užklausų apdorojimas paskirstytose biometrinių identifikavimo sistemose

Biographic Query Processing in Distributed Biometric Identification Systems

Magistro baigiamasis darbas

Atliko:	Rytis Karpuška	(parašas)
Darbo vadovas:	prof. habil. dr. Mindaugas Bloznelis	(parašas)
Recenzentas:		(parašas)

Vilnius – 2019

Turinys

Įvadas	2
1. Literatūros apžvalga	7
1.1. Užklausų klasifikacija	7
1.1.1. Griežto atitikmens užklausa	8
1.1.2. Taško užklausa	8
1.1.3. Lango užklausa	8
1.1.4. Regiono užklausa	8
1.1.5. Apgaubiančioji užklausa	8
1.1.6. Pilno regiono užklausa	9
1.1.7. Kaimynų užklausa	9
1.1.8. Artimiausio kaimyno užklausa	9
1.2. Daugiamačių duomenų indeksavimo metodų klasifikacija	9
1.2.1. Maišos funkcijomis paremti metodai daugiamačių duomenų indeksavimui	9
1.2.2. Hierarchiniai metodai daugiamačių duomenų indeksavimui	10
1.2.3. Erdvę užpildančiomis kreivėmis paremti metodai daugiamačių duomenų indeksavimui	11
1.3. SP-GIST karkasas	12
Literatūra	13
Priedas Nr.1	
Priedas Nr.2	

Įvadas

Kiekvieno žmogaus kūnas turi aibę požymių, pagal kuriuos jį galima unikalčiai identifikuoti (pvz.: pirštų atspaudai). Šių požymių egzistavimas davė pagrindą *biometrinėms identifikavimo sistemoms*. Šių sistemų paskirtis yra tarp visų užregistruotų žmonių surasti tą, kuriam priklauso duotieji biometriniai požymiai. Šiame darbe nagrinėjamoje sistemoje [Neu18] sąrašas žmonių, tarp kurių yra vykdoma paieška, yra papildomai atrenkamas pagal vartotojo pateiktą užklausą. Ši užklausa sąrašą paieškai sudaro pagal papildomus, ne biometrinius, duomenis (pvz.: amžių, lytį, gyvenamąją vietą) priskirtus kiekvienam sistemoje užregistruotam žmogui.

Biografiniai atributai bei biografinė schema. Aptartieji papildomi duomenys vadinami *biografiniais atributais*. Verta atkreipti dėmesį į tai, kad biografiniai atributai yra papildomi, būtinai ne biometriniai, duomenys.

Kiekvienas biografinis atributas turi savo vardą (pvz.: „Miestas“, „Amžius“), bei reikšmę (pvz.: „Vilnius“, „25-eri metai“). Visų atributų vardų aibė yra vadinama *biografinė schema*. Pavyzdžiui 1 lentelėje pateikiamame duomenų bazės pavyzdyje biografinė schema būtų {„Miestas“, „Amžius“}.

Žmogus	Biometriniai požymiai	Biografiniai atributai	
		Miestas	Amžius
Mindaugas	biometrinių požymių įrašas	Vilnius	35
Petras	biometrinių požymių įrašas	Utena	15
Eglė	biometrinių požymių įrašas	Zarasai	10
Dovilė	biometrinių požymių įrašas	Kelmė	20
Rytis	biometrinių požymių įrašas	Marijampolė	45
Tomas	biometrinių požymių įrašas	Anykščiai	30

1 lentelė. Pavyzdiniai biometrinės identifikavimo sistemos duomenys

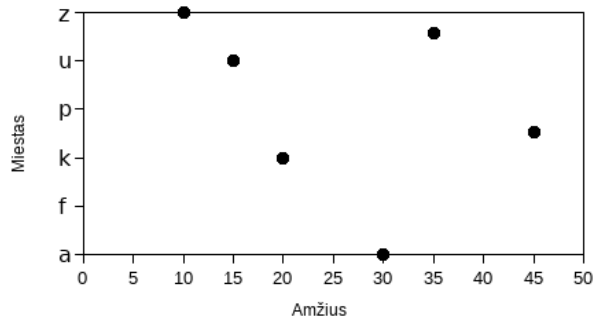
Kiekvienam žmogui gali būti priskiriamas daugiau negu vienas biografinis atributas, tačiau visiems žmonėms priskiriamų biografinių atributų schema (biografinė schema) turi būti tokia pati. Tai reiškia, kad, pavyzdžiui, jeigu Petru (žr.: 1 lentelę) buvo priskirtas gyvenamasis miestas ir amžius, tai visiems likusiems užregistruotiems žmonėms irgi bus priskiriamas gyvenamasis miestas ir amžius.

Nagrinėjama sistema palaiko dviejų tipų biografinius atributus:

- skaitinio tipo
- simbolių eilutės tipo

Tačiau esant poreikiui šis atributų tipų sąrašas gali būti plečiamas. Sistemoje visi tą patį vardą turintys atributai yra ir to pačio tipo.

Duomenų bazės modelis. Šiame darbe remiamasi duomenų bazės modeliu „Data cube“ [Mar00]. Nagrinėjamos sistemos atveju, kiekvienas atributas atitinka vieną, konkrečią, daugiamatės erdvės dimensiją.



1 pav. Pavyzdiniai biografinių atributų rinkiniai dvimatėje erdvėje.

1 paveikslėlyje pateikiamas tokios erdvės pavyzdys atitinkantis lentelėje 1 pateiktą duomenų bazės pavyzdį.

Duomenų bazės įrašams apdoroti bus naudojama palyginimo funkciją (1).

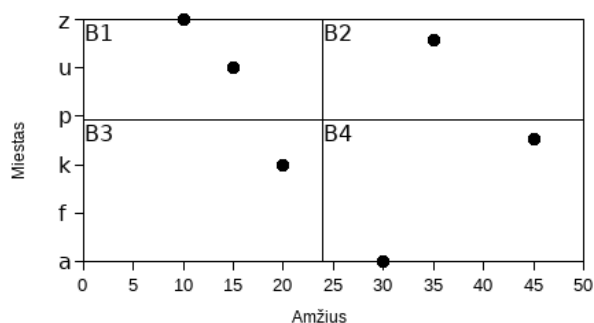
$$f_A(x_1, x_2) = \begin{cases} -1, & \text{jeigu } x_1 < x_2 \\ 0, & \text{jeigu } x_1 = x_2 \\ 1, & \text{jeigu } x_1 > x_2 \end{cases} \quad (1)$$

Čia x_1 ir x_2 yra tą patį vardą A turinčių atributų reikšmės. Simbolių eilutės tipo atributų reikšmės gali būti lyginamos leksikografinė tvarka.

Šiame darbe daroma prielaida, kad palyginimo funkcijos (1) atžvilgiu atributo reikšmių aibė yra pilnai sutvarkyta [HJ99].

Biometrinių įrašų blokai daugiamatėje erdvėje. Nagrinėjamos sistemos bazinis elementas yra įrašas. Vieną įrašą sudaro biometrinių požymių rinkinys susietas su biografinių atributų reikšmių rinkiniu. Sistemoje, operatyviojoje atmintyje, įrašai yra saugomi ir apdorojami ne po vieną, bet grupėmis. Šios grupės yra vadinamos *biometrinių įrašų blokais*. Kiekvienam įrašui registracijos metu yra laisvai parenkamas vienas blokas, kuriame jis bus saugomas.

Šiame darbe nagrinėjamame duomenų bazės modelyje biometrinių įrašų blokai yra ankščiau aptartos daugiamatės erdvės sritys, kurios apima visus konkrečiam blokui priskirtus įrašus (žr.: 2 pav.)



2 pav. B1-B4 – erdvės sritys atitinkančios biometrinių įrašų blokus

Biografinės užklauskos. Nurodžius pasirinktų biografinių atributų kitimo sritis – apibrėžiama įrašų aibė, kurioje ieškomi pasirinktų biometrinių požymių atitikmenys. Tokios paieškos užduotis vadinama *biografine užklausa*. Šiai užklausiai aprašyti yra skirta gramatika, kurios Backus ir Nauro forma [MR03] yra pateikiama 2 lentelėje.

užklausa	::=	<vienaris operatorius> <operandas> <operandas> <dvinaris operatorius> <operandas> "(" <užklausa> ")" <atributo vardas> <sąrašo operatorius> <sąrašas>
operandas	::=	<užklausa> <atributo vardas> "" <skaičius> "" "" <žodis> ""
vienaris operatorius	::=	<neprivalomas tarpas> "NOT" <neprivalomas tarpas>
dvinaris operatorius	::=	<neprivalomas tarpas> <dvinario operatoriaus ženklas> <neprivalomas tarpas>
dvinario operatoriaus ženklas	::=	">" ">=" "<" "<=" "=" "<>" "AND" "OR"
sąrašo operatorius	::=	<neprivalomas tarpas> "IN" <neprivalomas tarpas>
sąrašas	::=	"(" <sąrašo elementai> ")"
sąrašo elementai	::=	<sąrašo elementas> <sąrašo elementas> "," <sąrašo elementai>
sąrašo elementas	::=	"" <žodis> "" "" <skaičius> ""
atributo vardas	::=	<neprivalomas tarpas> <žodis> <neprivalomas tarpas>
neprivalomas tarpas	::=	"" " " <neprivalomas tarpas>
žodis	::=	<raidė> <žodis> <raidė> <žodis> <skaičius>
skaičius	::=	"0" "1" "2" "3" "4" "5" "6" "7" "8" "9"
raidė	::=	"A" "B" "C" ... "Z" "a" "b" "c" ... "z"

2 lentelė. Biografinės užklauskos aprašymo gramatikos Backus ir Nauro forma

Keletas užklauskos pavyzdžių pateikiama 3 lentelėje laikant, kad biografinė schema yra {„Miestas“, „Amžius“}.

	Užklauskos aprašymas	Užklauskos interpretacija
Pavyzdys 1	Amžius >= '18'	Visi suaugę žmonės
Pavyzdys 2	Amžius >= '18' AND Miestas IN ('Vilnius', 'Kaunas')	Visi suaugę vilniečiai ir kauniečiai
Pavyzdys 3	NOT (Miestas = 'Vilnius' AND Amžius >= '18')	Visi žmonės išskyrus suaugusius vilniečius

3 lentelė. Užklauskų aprašymo pavyzdžiai.

Biografinių užklausų apdorojimas. Smulkiausias įrašų sąrašas kuriame sistema [Neu18] šiuo metu gali vykdyti paiešką yra vienas biometrinių įrašų blokas. Todėl vartotojo biografinės užklausos apdorojimas yra skaidomas į tokius tris etapus:

1. Atmetimo etapas: Atmetami visi blokai, neturintys įrašų, kurių atributų rinkiniai atitinka vartotojo užklausą.
2. Paieškos etapas: Atliekama paieška blokuose, kurie liko po atmetimo etapo.
3. Filtravimo etapas: Atmetami visi paieškos etape rasti įrašai, kurių atributų rinkiniai neatitinka vartotojo užklausos.

Verta pastebėti, kad po atmetimo etapo likęs blokų kiekis priklauso nuo metodo, pagal kurį yra parenkama daugiamačių erdvės sritis atributų rinkinių saugojimui.

Darbo tikslas. Šio darbo metu siekiama padidinti biometrinės identifikavimo sistemos [Neu18] pralaidumą (užklausų skaičių per laiko vienetą). Tuo tikslu ketinama minimizuoti biometrinių įrašų blokų skaičių, kuris lieka po atmetimo etapo.

Tam bus pritaikyti ir palyginti du įrašų priskyrimo blokams metodai:

- Metodas paremtas priešdėliniu rūšavimu.
- Metodas paremtas K-d medžiu.

Darbą planuojama skirstyti į tokius uždavinius:

1. Išanalizuoti tipinių užklausų statistines savybes, pasiruošti testavimo duomenis.
2. Empiriškai įvertinti sistemos pralaidumo priklausomybę nuo įrašų skaičiaus bloke.
3. Įdiegti metodą paremtą priešdėliniu rūšavimu.
4. Įdiegti metodą paremtą K-d medžiu.
5. Palyginti įdiegtus metodus tarpusavyje ir su sistema [Neu18]

Numatomas darbų eiliškumas:

1. Apžvelgiami kiti panašūs darbai bei pateikiami šaltiniai, kuriais remiasi šis darbas.
2. Apžvelgiama kokios užklausų savybės išplaukia iš apibrėžtos gramatikos, kokiomis statistinėmis savybėmis pasižymi vartotojų dažniausiai pateikiamos užklausos.
3. Aprašoma kaip bus palyginami įrašų priskyrimo sritims metodai, bei aprašomas testavimo duomenų rinkinys.
4. Empiriškai nustatoma sistemos pralaidumo priklausomybė nuo maksimalaus bloko dydžio. Parenkamas bloko dydis, kuris bus naudojamas palyginant metodus.

5. Įgyvendinamas ir palyginamas metodas paremtas priešdėliniu rūšiavimu.
6. Įgyvendinamas ir palyginamas metodas paremtas K-d medžiu.
7. Aprašomi pasiekti rezultatai bei pateikiamos išvados.

1. Literatūros apžvalga

Panaši problema į aptartąją įvadą yra nemažai tyrinėjama duomenų bazių kontekste. Čia minimuojamas disko operacijų skaičius siekiant sumažinti duomenų bazės atsako laiką bei padidinti pralaidumą (apdorotų užklausų skaičių per laiko vienetą) [GUW00]. Panašiai kaip šiame darbe siekiama minimizuoti biometrinių įrašų blokų skaičių likusį po atmetimo etapo siekiant pagerinti sistemos [Neu18] pralaidumą. Tuo tikslu yra naudojama duomenų struktūra, vadinama *duomenų indeksu*. Jeigu duomenys yra daugiamačiai (vienas įrašas gali susidėti iš daugiau negu vienos reikšmės), tuomet indeksas tokiems duomenims vadinamas *daugiamačių duomenų indeksu*, o metodas pagal kurį šis indeksas yra sudaromas bei naudojamas *daugiamačių duomenų indeksavimo metodu*.

1.1. Užklausų klasifikacija

Šiame darbe palyginant indeksavimo metodus sistemoje [Neu18] siekiama apimti kiek galima daugiau užklausų klasių pagal Gaede ir Günther [GG98] pateikiamą daugiamačių užklausų klasifikaciją:

1. Griežto atitikmens užklausa
2. Taško užklausa
3. Lango užklausa
4. Regiono užklausa
5. Apgaubiančioji užklausa
6. Pilno regiono užklausa
7. Kaimynų užklausa
8. Artimiausio kaimyno užklausa

Autorius duomenis ir užklausas nagrinėja d dimensijų euklido erdvėje E^d . Atskirus įrašus apibrėžia kaip objektus o kurie gali turėti 0 ar daugiau papildomų atributų nesusijusių su erdve E^d (pvz.: vardas, pavadinimas, amžius...), bei griežtai vieną atributą $o.G$, kuris apibūdina objekto o padėtį erdvėje E^d . Šis $o.G$ atributas yra aibė taškų, kuriuos objektas o užima erdvėje E^d . Objektams yra apibrėžiami operatoriai $=$, \cap , bei $dist(o_1, o_2)$. Du objektai o_1 ir o_2 skaitomi lygiais $o_1 = o_2$ tada ir tik tada jeigu abiejų objektų užimamų taškų aibės $o_1.G$ ir $o_2.G$ sutampa. Dviejų objektų o_1 ir o_2 sankirta $o_1 \cap o_2$ yra aibė taškų, kurie patenka ir į $o_1.G$ ir į $o_2.G$. Ir galiausiai atstumas tarp dviejų objektų o_1 ir o_2 $dist(o_1, o_2)$ skaitomas mažiausias atstumas tarp bet kurių dviejų taškų esančių $o_1.G$ ir $o_2.G$ aibėse.

1.1.1. Griežto atitikmens užklausa

Griežto atitikmens užklausa yra tokia užklausa, kuri duotajam objektui o' erdvėje E^d randa visus objektus, kurių erdvės sritys sutampa su duotąja:

$$EMQ(g) = \{o | o'.G = o.G\} \quad (2)$$

1.1.2. Taško užklausa

Taško užklausa yra tokia užklausa, kuri duotam taškui p erdvėje E^d randa visus objektus, kurie turi bendrą tašką:

$$PQ(p) = \{o | \{p\} \cap o.G = \{p\}\} \quad (3)$$

Žiūrėti priedą Nr. 2.

1.1.3. Lango užklausa

Lango užklausa, tai tokia užklausa, kuri duotiems d intervalams $I^d = [l_1, u_1] \times [l_2, u_2] \times \dots \times [l_d, u_d]$ (po vieną kiekvienai erdvės E^d koordinačių ašiai) randa visus objektus o kurie turi bendrą tašką:

$$WQ(I^d) = \{o | I^d \cap o.G \neq \emptyset\} \quad (4)$$

Verta pastebėti, kad lango užklauskos atveju visos erdvės sritys kraštinės yra lygegriaišios erdvės E^d koordinačių ašims. Žiūrėti priedą Nr. 2.

1.1.4. Regiono užklausa

Regiono užklausa yra labai panaši į Lango užklausa, tačiau sritys kraštinės gali būti laisvai pasirinktos, ir neturi būti lygegriaišios koordinačių ašims. Regiono užklausa randa visus objektus, kurie turi bendrą tašką su duotuoju objektu o' .

$$IQ(g) = \{o | o'.G \cap o.G \neq \emptyset\} \quad (5)$$

Žiūrėti priedą Nr. 2.

1.1.5. Apgaubiančioji užklausa

Apgaubiančioji užklausa yra tokia užklausa, kuri randa visus objektus o , kurių erdvės sritys $o.G$ pilnai apima pateiktąjį objektą o' :

$$EQ(g) = \{o | (o'.G \cap o.G) = o.G\} \quad (6)$$

Žiūrėti priedą Nr. 2.

1.1.6. Pilno regiono užklausa

Pilno regiono užklausa iš esmės yra priešinga apgaubiančiajai. Pilno regiono užklausa yra tokia užklausa, kuri randa visus objektus o , kurių erdvės sritis $o.G$ pilnai patenka į pateiktąjį objektą o' :

$$CQ(g) = \{o | (o'.G \cap o.G) = o'.G\} \quad (7)$$

Žiūrėti priedą Nr. 2.

1.1.7. Kaimynų užklausa

Kaimynų užklausa yra tokia užklausa, kuri pagal duotąjį objektą o' suranda visus šio objekto kaimynus, t.y. objektus o kurie turi bendrą kraštinę erdvėje E^d :

$$AQ(g) = \{o | (o'.G \cap o.G) \neq \emptyset \wedge o'.G^\circ \cap o.G^\circ = \emptyset\} \quad (8)$$

Čia $o.G^\circ$ reiškia visus vidinius taškus, kurie priklauso sričiai $o.G$. Žiūrėti priedą Nr. 2.

1.1.8. Artimiausio kaimyno užklausa

Artimiausio kaimyno užklausa yra tokia užklausa, kuri duotam objektui o' randa artimiausią kaimyną (verta pastebėti, kad šiuo atveju kaimynai gali ir neturėti bendrų kraštinių).

$$NNQ(o') = \{o | \forall o'' : dist(o'.G, o.G) \leq dist(o'.G, o''.G)\} \quad (9)$$

1.2. Daugiamačių duomenų indeksavimo metodų klasifikacija

Lu ir Ooi [LO93], Gaede ir Günther [GG98], bei Böhm, Christian, Stefan, Daniel A [BBK01] apžvelgia įvairius daugiamačių duomenų indeksus, bei pateikia schemą padedančią suprasti jų istoriją (žiūrėti priedą Nr. 1).

Autoriai šiuos metodus suskirsto į tris grupes:

- Metodai paremti maišos funkcijomis.
- Hierarchiniai metodai.
- Metodai paremti erdvę užpildančiomis kreivėmis [Bad12].

1.2.1. Maišos funkcijomis paremti metodai daugiamačių duomenų indeksavimui

Verta pastebėti, kad dažnai maišos funkcijomis paremti metodai yra tinkami tik griežto atitikmens užklausoms [NHS81] [TS82]. Todėl šiame darbe tokie metodai nebus įgyvendinami ir lyginami sistemoje [Neu18].

1.2.2. Hierarchiniai metodai daugiamačių duomenų indeksavimui

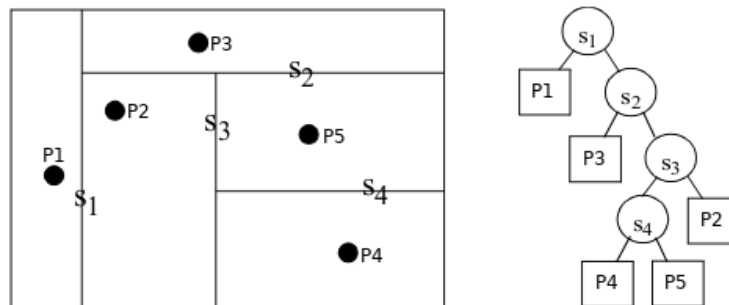
Hierarchiniai daugiamačių duomenų indeksai yra paremti dvejetainiais ar aukštesnio atsišakojimo faktoriaus medžiais (trejetainiai, ketvirtiniai...) [GG98]. Šie indeksai saugo įrašus ne po vieną, bet grupėmis. Dažniausiai kiekviena grupė yra randama medžio lapuose (vadinama *duomenų viršūne*). Vidinės viršūnės (vadinamos *indekso viršūnėmis*) yra naudojamos kaip kelrodžiai ieškant duomenų viršūnių. Kiekviena indekso viršūnė nurodo visas duomenų viršūnes, kurios gali būti rastos šios indekso viršūnės pomedyje.

Užklausų apdorojimas yra skaidomas į du etapus:

1. Iteravimas medžiu.
2. Įrašų filtravimas.

Iteravimo medžiu etape, yra „prabėgamas“ medis nuo šaknies iki lapų ir atrenkamos visos duomenų viršūnės, kurios gali turėti įrašų atitinkančių užklausos kriterijus. Filtravimo metu atrenkami įrašai esantys iteravimo etape atrinktose grupėse ir tenkinatys užklausos kriterijus [BKS⁺94] [BBK01]. Verta pastebėti, kad sistemoje [Neu18] užklausų apdorojimo etapai yra labai panašūs.

Kd-medis. Šiame darbe bus aptariamas biometrinių įrašų priskyrimo blokams metodas paremtas Kd-medžiu [Ben79]. Kd-medžių duomenys yra taškai E^d erdvėje. Kd-medis yra dvejetainis medis, kurio lapuose (duomenų viršūnėse) yra saugomi vienas ar daugiau d -mačių taškų. Kiekviena vidinė medžio viršūnė (indekso viršūnė) dalina erdvę E^d į dvi nepersidengiančias dalis. Taškai patenkantys į vieną dalį patenka į kairiąją pomedį, o patenkantis į kitą dalį – į dešinią pomedį (žr.: 3 pav.). Erdvės dalinimas į dvi dalis yra parenkamas taip: kiekvienai vidinei viršūnei yra parenkama koordinačių ašis (pvz.: x) ir reikšmė (pvz.: 5). Tuomet visi taškai, kurių x koordinatės reikšmė yra mažesnė už parinktą reikšmę (pavyzdyje $[-\infty; 5)$), patenka į kairiąją pomedį, likę taškai (pavyzdyje $[5; \infty)$) – į dešinią pomedį. Nėra griežtai apibrėžta kokia koordinačių ašis ar reikšmė šioje ašyje turi būti parinkta kiekvienai viršūnei, todėl šiuo tikslu taikomos įvairios euristikos.



3 pav. Kd-medžio pavyzdys.

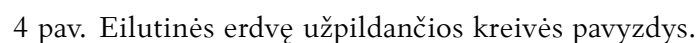
Paveiksliuke 3 pateikiamas Kd-medžio pavyzdys. Čia kairėje – ši medį atitinkanti erdvė E^d . Taškai P_1-P_5 atitinka daugiamačius duomenis, o tiesės S_1-S_4 – erdvės E^d padalijimus atitinkamai

Hierarchiniai metodai daugiamačių duomenų indeksavimui yra plačiai taikomi duomenų bazių [BBK01], sensorių tinklų [LKG⁺03], paveiksliukų paieškoje [SH08], privatumo [HMC⁺12] [XXY10] ir kitose srityse.

Kaip ir hierarchiniuose metoduose taip ir erdvę užpildančiomis kreivėmis paremtuose metoduose duomenys nagrinėjami kaip taškai euklido erdvėje E^d

Siekiant sudaryti tokią tvarką, E^d erdvė suskirstoma į gardelę (į kiekvieną laukelį šioje gardelėje gali patekti nulis, vienas ar daugiau taškų). Kiekvienam laukeliui šioje gardelėje yra priskiriamas unikalūs skaičius pagal kurį laukeliai yra surikiuojami ir indeksuojami vienmačiais indeksavimo metodais. Šie unikalūs skaičiai yra priskiriami pagal tai kokia tvarka erdvę užpildanti kreivė [Bad12] „prabėga“ pro laukelius. Aptarsime dvi tokias kreives:

- Eilutinė kreivė.** Eilutinė kreivė yra viena iš paprasčiausių erdvę užpildančių kreivių. Ji negali būti naudojama begalinėje erdvėje, todėl tarkime, kad $[L_i; U_i]$ yra erdvės E^d ribos dimensijos i atžvilgiu. Eilutinė kreivė iš pradžių „prabėga“ visus taškus didėjimo tvarka $[x, L_2, \dots, L_d]$, kur $x \in [L_1; U_1]$. Paskui „prabėga“ $[x, L_2 + 1, \dots, L_d]$, paskui $[x, L_2 + 2, \dots, L_d]$ ir t.t. (žr.: 4 pav.).



Formaliai tvarka yra apibrėžiama sąryšio:

$$p_1 < p_2 \text{ jeigu } RWSFC(p_1) < RWSFC(p_2) \quad (10)$$

Čia p_1 ir p_2 yra taškai erdvėje E^d , o $RWSFC(p)$:

$$RWSFC(p) = \sum_{i=1}^d [(p_i - L_i) \prod_{j=0}^{i-1} U_j - L_j] \quad (11)$$

Čia daroma prielaida, kad $U_0 - L_0 = 1$.

Z-kreivė.

1.3. SP-GIST karkasas

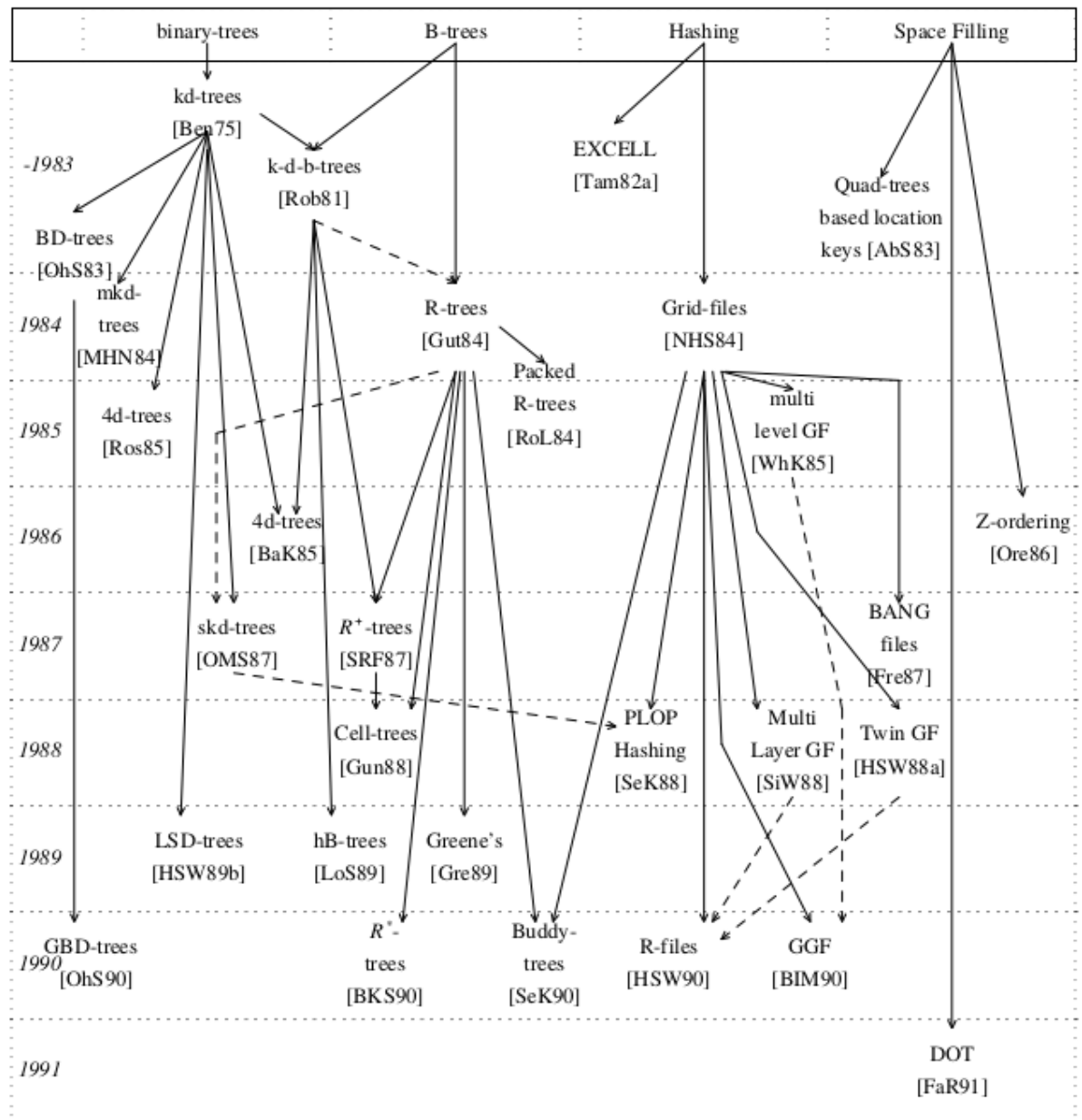
Literatūra

- [Bad12] Michael Bader. *Space-filling curves: an introduction with applications in scientific computing*, tom. 9. Springer Science & Business Media, 2012.
- [BBK01] Christian Böhm, Stefan Berchtold ir Daniel A Keim. Searching in high-dimensional spaces: index structures for improving the performance of multimedia databases. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 33(3):322–373, 2001.
- [Ben79] Jon Louis Bentley. Multidimensional binary search trees in database applications. *IEEE Transactions on Software Engineering*, (4):333–340, 1979.
- [BKS⁺94] Thomas Brinkhoff, Hans-Peter Kriegel, Ralf Schneider ir Bernhard Seeger. *Multi-step processing of spatial joins*, tom. 23 numeris 2. ACM, 1994.
- [Com79] Douglas Comer. Ubiquitous b-tree. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 11(2):121–137, 1979.
- [GG98] Volker Gaede ir Oliver Günther. Multidimensional access methods. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 30(2):170–231, 1998.
- [GUW00] Hector Garcia-Molina, Jeffrey D Ullman ir Jennifer Widom. *Database system implementation*, tom. 654. Prentice Hall Upper Saddle River, NJ: 2000, p.p. 34–38.
- [HJ99] Karel Hrbacek ir Thomas Jech. *Introduction to Set Theory, Revised and Expanded*. Crc Press, 1999.
- [HMC⁺12] Bijit Hore, Sharad Mehrotra, Mustafa Canim ir Murat Kantarcioglu. Secure multi-dimensional range queries over outsourced data. *The VLDB Journal*, 21(3):333–358, 2012.
- [HOS97] Sabine Hanke, Th Ottmann ir Eljas Soisalon-Soininen. Relaxed balanced red-black trees. *Italian Conference on Algorithms and Complexity*, p.p. 193–204. Springer, 1997.
- [LKG⁺03] Xin Li, Young Jin Kim, Ramesh Govindan ir Wei Hong. Multi-dimensional range queries in sensor networks. *Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems*, p.p. 63–75. ACM, 2003.
- [LO93] Hongjun Lu ir Beng Chin Ooi. Spatial indexing: past and future. *IEEE Data Eng. Bull.*, 16(3):16–21, 1993.
- [Mar00] Patrick Marcel. Modeling and querying multidimensional databases: an overview. *Networking and Information Systems Journal*, 2(5/6):515–548, 2000.
- [MR03] Daniel D McCracken ir Edwin D Reilly. Backus-naur form (bnf), 2003.
- [Neu18] UAB Neurotechnology. Megamatcher accelerator solution for large-scale multi-biometric systems. http://download.neurotechnology.com/MegaMatcher_Accelerator_Brochure_2018-07-26.pdf, 2018. tikrinta 2018-09-11.
- [NHS81] Jürg Nievergelt, Hans Hinterberger ir Kenneth C Sevcik. The grid file: an adaptable, symmetric multi-key file structure. *Conference of the European Cooperation in Informatics*, p.p. 236–251. Springer, 1981.

- [SH08] Chanop Silpa-Anan ir Richard Hartley. Optimised kd-trees for fast image descriptor matching. *Computer Vision and Pattern Recognition, 2008. CVPR 2008. IEEE Conference on*, p.p. 1–8. IEEE, 2008.
- [TS82] Markku Tamminen ir Reijo Sulonen. The excell method for efficient geometric access to data. *Design Automation, 1982. 19th Conference on*, p.p. 345–351. IEEE, 1982.
- [XXY10] Yonghui Xiao, Li Xiong ir Chun Yuan. Differentially private data release through multidimensional partitioning. *Workshop on Secure Data Management*, p.p. 150–168. Springer, 2010.

Priedas Nr. 1

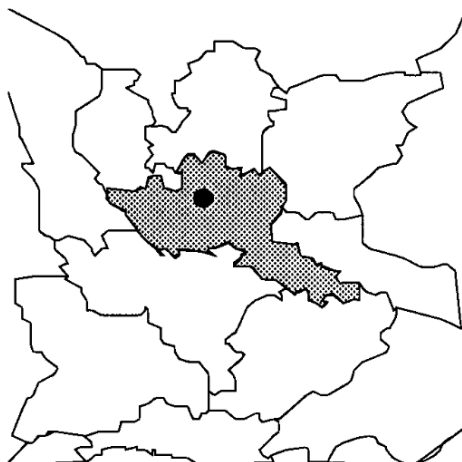
Metodų skirtų daugiamačių duomenų indeksavimui apžvalga



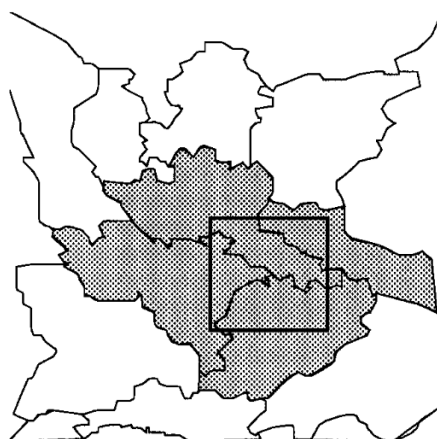
5 pav. [Bad12] pateikiama metodų, skirtų daugiamačių duomenų indeksavimui, schema

Priedas Nr. 2

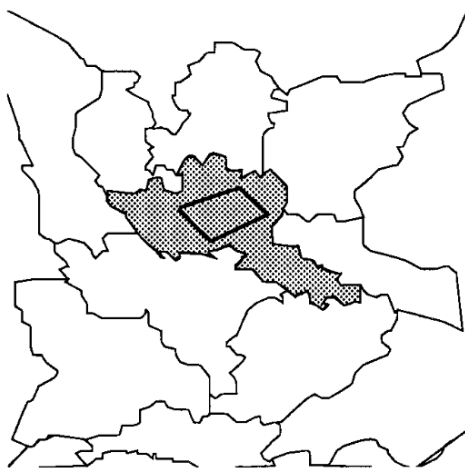
Įvairių užklausų pavyzdžiai



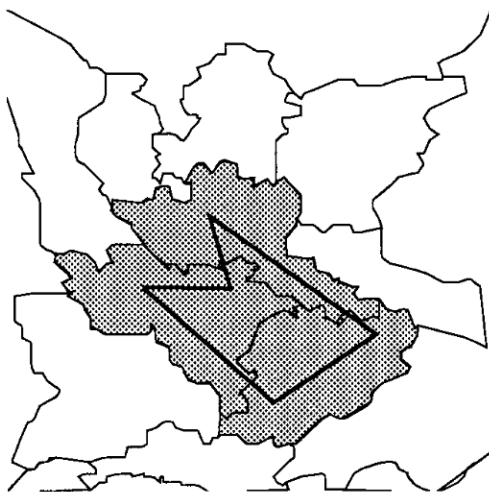
6 pav. Taško užklausos pavyzdys



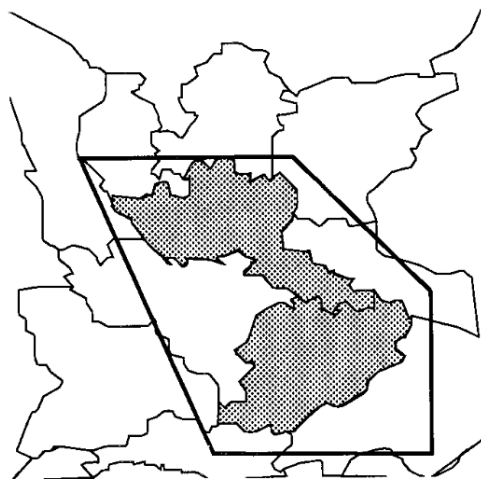
7 pav. Lango užklausos pavyzdys



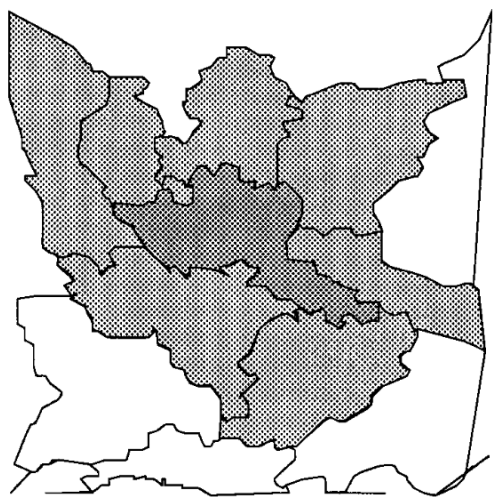
8 pav. Apgaubiančiosios užklauso pavyzdys



9 pav. Regiono užklauso pavyzdys



10 pav. Pilno regiono užklauso pavyzdys



11 pav. Kaimynų užklauso pavyzdys