



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

FUNDAMENTINIŲ MOKSLŲ FAKULTETAS

INŽINERINĖS GRAFIKOS KATEDRA

Irena Markievicz

**GRAFINIŲ MODELIŲ PANAŠUMO TYRIMAS
PANAUDOJANT SFERINĖS HARMONIKOS FUNKCIJAS**

**GRAPHICAL MODELS SIMILARITY RESEARCH
BASED ON SPHERICAL HARMONICS**

Baigiamasis magistro darbas

Informacinių technologijų studijų programa, 62407T104 kodas

Inžinerinės ir kompiuterinės grafikos specializacija

Vilnius, 2010

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

FUNDAMENTINIŲ MOKSLŲ FAKULTETAS

INŽINERINĖS GRAFIKOS KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas

(parašas)

(vardas, pavardė)

2010-_____

Irena Markievicz

GRAFINIŲ MODELIŲ PANAŠUMO TYRIMAS PANAUDOJANT SFERINĖS HARMONIKOS FUNKCIJAS

GRAPHICAL MODELS SIMILARITY RESEARCH BASED ON SPHERICAL HARMONICS

Baigiamasis magistro darbas

Informacinių technologijų studijų programa

Inžinerinės ir kompiuterinės grafikos specializacija

Vadovas dr. Saulius Dereškevičius

(Parašas)

(Data)

Konsultantas doc. dr. Angelė Kaulakienė

(Parašas)

(Data)

Konsultantas

(Moksl. laipsnis, vardas pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2010

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
FUNDAMENTINIŲ MOKSLŲ FAKULTETAS
INŽINERINĖS GRAFIKOS KATEDRA

TVIRTINU

Technologijos mokslai

mokslo sritis

Katedros vedėjas

Informatikos inžinerija

mokslo kryptis

(parašas)

Informatikos inžinerija

studijų kryptis

(vardas, pavardė)

Informacinės technologijos

studijų programa

2010-_____

**BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS**

2010-.....Nr.

Vilnius

Studentei IRENAI MARKIEVICZ

Baigiamojo darbo tema .

**GRAFINIŲ MODELIŲ PANAŠUMO TYRIMAS
PANAUDOJANT SFERINĖS HARMONIKOS FUNKCIJAS**

patvirtinta 2010 m. d. dekanų įsakymu Nr.

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2010 m. birželio 7 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Išnagrinėti metodus, kurie leistų automatizuotai aprašyti grafinius objektus tokių būdu, kad būtų galima vykdyti jų greitą ir patikimą atranką pagal panašumą vienas į kitą. Pasirinkti patikimiausią ir nustatyti šių metodų geriausias veikimo sąlygas.

Baigiamojo darbo rengimo

konsultantai:.....

.....

.....

(vardas, pavardė, mokslinis laipsnis ir vardas)

Vadovas

(parašas)

dr. SAULIUS DEREŠKEVIČIUS

Užduotį gavau

.....

(parašas)

IRENA MARKIEVICZ

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

Fundamentinių mokslų fakultetas

Inžinerinės grafikos katedra

ISBN

ISSN

Egz. sk. 3

Data **2010-06-17**

Informacinių technologijų studijų programos baigiamasis magistro darbas

Pavadinimas: **Grafinių modelių panašumo tyrimas panaudojant sferinės harmonikos funkcijas**

Autorius: **Irena Markievicz**

Vadovas: **dr. Saulius Dereškevičius**

Kalba

☐

lietuvių

☐

užsienio

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe nagrinėjamos sferinės harmonikos deskriptoriaus sukūrimo galimybės panaudoti jį atpažįstant dvimačių grafinių objektų formas. Tam tikslui išnagrinėjamos galimos grafinių objektų formos atpažinimo technologijos ir algoritmai. Išsiaiškinama, kaip sukuriamas matematinis sferinės harmonikos modelis ir kaip galima jį vizualizuoti grafinėje sistemoje. Išnagrinėjamas sferinės harmonikos funkcijos deskriptoriaus kūrimo bei paieškos vykdymo algoritmas. Apžvelgti eksperimentiniai ir teoriniai darbai, išnagrinėtos realizuotos grafinių objektų paieškos sistemos bei objektų formos atpažinimo efektyvumas. Realizuota sferinės harmonikos deskriptorių grafiniam objektui sukurianti programa, kuri leidžia taip pat lyginti deskriptorius vieną su kitu bei atrinkti labiausiai užklausą atitinkančius grafinius objektus.

Išnagrinėjus teorinius ir praktinius sferinės harmonikos funkcijos deskriptoriaus kūrimo aspektus bei bandymų rezultatus, pateikiamos baigiamojo darbo išvados ir siūlymai.

Darbą sudaro šešios dalys: įvadas, problemos analizė ir formulavimas, teorinis pagrindimas, eksperimentas ir jo rezultatų įvertinimas – lyginamoji analizė, išvados ir siūlymai, literatūros sąrašas.

Darbo apimtis – 59 psl. teksto be priedų, 26 iliustr., 7 lent., 27 bibliografiniai šaltiniai. Atskirai pridedami darbo priedai.

Reikšminiai žodžiai: grafinio objekto formos deskriptorius, sferinės harmonikos funkcija, grafinių objektų formos panašumo tyrimas, grafinių objektų paieška.

Vilnius Gediminas Technical University

Faculty of Fundamental Sciences

Department of Engineering Graphics

ISBN

ISSN

Copies No. 3

Date 17-06-2010

Information Technologies study programme master thesis

Title: **Graphical models similarity research based on spherical harmonics**

Author: **Irena Markievicz** Academic supervisor: **dr. Saulius Dereškevičius**

Kalba

☐

lietuvių

☐

užsienio

Annotation

The master thesis examined opportunities to use the spherical harmonics descriptor for identifying two-dimensional graphics models shapes. For this purpose, the possible forms of graphics recognition algorithms and technologies are examined. It is found how to create a mathematical model of spherical harmonics and how it can be to visualize in the graphical system. The algorithm of spherical harmonics' descriptor's creation and graphical objects' shape search is examined. The experimental and theoretical works are reviewed; realized graphical object shape search engines and their shape recognition performance are examined. Realized graphical object search application is based on spherical harmonics descriptors and allows comparing one search query descriptor with another from database and selects the most consistent graphical objects.

An examination of theoretical and practical spherical harmonic descriptors aspects and the results of experiments allow providing the conclusion of the research and recommendations for further work.

Structure: introduction, problem analysis and formulation, the theoretical justification, the assessment of the experiment and its results - a comparative analysis, conclusions and suggestions, references.

Thesis consists: 59 pages of text without appendixes, 26 pictures, 7 tables, 27 bibliographical entries. Appendixes included.

Keywords: graphical object shape descriptor, spherical harmonics, graphical objects shape similarity research, graphical object search.

TURINYS

1.	ĮVADAS.....	11
1.1.	Tyrimo objektas	11
1.2.	Darbo tikslas ir uždaviniai	11
1.3.	Temos naujumas	11
1.4.	Temos aktualumas.....	12
1.5.	Tyrimo metodai.....	13
1.5.1.	Stebėjimo metodas	13
1.5.2.	Dokumentų analizė	13
1.5.3.	Eksperimentas	14
1.5.4.	Atvejo studija	14
1.6.	Mokslinė darbo vertė	14
1.7.	Darbo aprobacija	14
2.	PROBLEMOS ANALIZĖ IR FORMULAVIMAS.....	15
2.1.	Grafinių objektų klasifikavimas.....	15
2.2.	Formos deskriptoriaus kokybiškumo įvertinimas	16
3.	TEORINIS PAGRINDIMAS.....	17
3.1.	Formų panašumo atpažinimo algoritmai ir jų savybės	17
3.1.1.	Objekto skeleto transformacijos metodai – dvimačio objekto atvaizdavimas vienmate struktūra	17
3.1.1.1.	Fourierio kontūro transformacija	18
3.1.1.2.	Stochastiniai metodai	18
3.1.2.	Erdvinės srities technikos.....	19
3.1.2.1.	Grandinės kodas (angl. <i>Chain Code</i>)	19
3.2.	Sferinės harmonikos funkcijos grafinių objektų formos deskriptorius.....	20
3.2.1.	Matematinis sferinės harmonikos funkcijos modelis.....	20
3.2.2.	Grafinė sferinių harmonikų interpretacija.....	21
3.2.3.	Sferinės harmonikos funkcijos deskriptoriaus kūrimo algoritmas.....	23
3.2.4.	Sferinės harmonikos funkcijos deskriptoriaus invariantiškumas.....	24
3.3.	The Princeton Shape Benchmark – grafinių objektų panašumo tyrimo bei jų paieškos sistema	26
3.3.1.	PSB apžvalga	26
3.3.2.	Objektų formos užklauskos.....	27
3.3.3.	Užklauskų braižymas	28
3.3.4.	Sistemos realizacija.....	31
3.3.5.	Grafinių objektų panašumo tyrimas – eksperimentų rezultatai.	32

4.	EKSPERIMENTAS IR JO REZULTATŲ ĮVERTINIMAS, LYGINAMOJI ANALIZĖ	35
4.1.	Projektuojamos sistemos funkcijų aprašymas – panaudos atvejų diagrama.....	35
4.2.	Programos veiksmų – atoveiksmių modelis. Sekų diagrama.....	36
4.3.	Programos architektūra – klasių diagrama.....	37
4.4.	Programos realizacija.....	39
4.4.1.	Tinklo braižymas.....	40
4.4.2.	Mazgų žymėjimas.	41
4.4.3.	Sąsaja su duomenų baze.....	41
4.4.4.	Labiausiai užklausa atitinkančio grafinio objekto paieška.	42
4.4.5.	Rezultatų pateikimas ekrane.	42
4.4.6.	Programos darbo rezultatai.	42
4.4.6.1.	Paieškos efektyvumas pagal užklauso vykdomo laiko kriterijų.....	43
4.4.6.2.	Grafinių objektų formos atitikimas.....	44
4.4.6.3.	Sferinės harmonikos deskriptoriaus parametrų bei tinklo tankumo įtaka objektų panašumui ir jų paieškai.....	45
5.	MAGISTRANTO PUBLIKUOTAS STRAIPSNIS	48
6.	IŠVADOS	55
	LITERATŪRA.....	58

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. Centrinės funkcijos skaičiavimas.....	18
2 pav. Bendras grandinės kodo atvejis.....	19
3 pav. Sferinės koordinačių sistemos schema ir trimatis modelis.	21
4 pav. Grafinis sferinės harmonikos funkcijų atvaizdavimas sferos orbitalinėmis linijomis ir mazgais...	22
5 pav. Sferinės harmonikos funkcijos deskriptoriaus skaičiavimo schema.....	24
6 pav. Sferinės harmonikos deskriptoriaus pasukimo skaičiavimo etapai.....	25
7 pav. Sistemos modelis ir jos veikimas	27
8 pav. Skirtingas tos pačios klasės objektų atvaizdavimas koordinačių sistemoje.....	28
9 pav. Trimačių objektų užklauskos kūrimo grafinė vartotojo sąsaja	29
10 pav. Dvimačių užklauskų kūrimo grafinė vartotojo sąsaja.....	29
11 pav. Galimi grafinėse užklausoje panaudoti vartotojų atvaizdavimai.....	30
13 pav. Skirtingos objekto kontūro projekcijos.	30
13 pav. Formos deskriptoriaus skaičiavimas	31
14 pav. Duomenų srautai paieškos sistemoje	32
15 pav. Trimačių objektų paieškos mechanizmas	33
16 pav. Algoritmų efektyvumas pagal užklauskos ir pateiktų rezultatų tikslumą.....	34
17 pav. Sukurtos makrokomandos panaudos atvejų diagrama	35
18 pav. Sukurtos makrokomandos sekų diagrama.....	36
19 pav. Pasirinktos klasės realizacijos pavyzdys - „Tinklas“ metodai	38
20 pav. Sistemos klasių diagrama.....	38
21 pav. Grafinio objekto mazgų tinklo sudarymo kortelė	39
22 pav. Sferinės harmonikos deskriptoriaus skaičiavimo kortelė.....	39
23 pav. Rezultatų pateikimo kortelė	40
24 pav. Tinklo braižymo pavyzdys.....	40
25 pav. Grafinio objekto mazgai.....	41
26 pav. Užklauskų vykdymo laiko diagrama.....	43

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Kelios sferinės harmonikos funkcijos reikšmės.....	20
2 lentelė. Dviejų taškų (HSH(2)), trijų taškų (HSH(3)) ir kombinuoto (HSH(2)(3)+SHD) algoritmų efektyvumo palyginimas.	33
3 lentelė. Vartotojo veiksmų ir sistemos atoveiksmių seka.....	37
4 lentelė. Užklausų vykdymo laikas, priklausomai nuo objekto tipo, tinklo tikslumo bei sferinės harmonikos deskriptoriaus l ir m parametrų reikšmių.	43
5 lentelė. Grafinių objektų formos atitikimo bandymų rezultatai.....	44
6 lentelė. Euklido atstumai su $m=3$ ir $l=3$ parametrų reikšmėmis bei tinklo tikslumu=10.....	46
7 lentelė. Euklido atstumai su $m=5$ ir $l=2$ parametrų reikšmėmis bei tinklo tikslumu=10.....	46

SANTRUMPOS

3D ir 2D modeliai	trimačiai ir dvimačiai grafiniai modeliai
CAR modelis	(angl. <i>circular autoregressive model</i> - CAR) cirkuliacinis autoregresijos modelis
MVC	„modelis-atvaizdavimas-valdiklis“ sistemų architektūros modelis (angl. <i>Model View Control</i> - MVC)
SH	sferinės harmonikos funkcija (angl. <i>Spherical Harmonics</i>), kurios pagrindu kuriamas grafinių objektų deskriptorius
SHD	grafinio modelio deskriptorius, kuriamas pasitelkus sferinės harmonikos funkciją (angl. <i>Spherical Harmonics Descriptor</i> - SHD)
UMK (angl. UML)	universali modeliavimo kalba (angl. <i>Universal Modeling Language</i>), kuria kuriamos sistemos projektavimo diagramos
VBA	(angl. <i>Visual Basic for Applications</i>) programavimo kalba, skirta taikomosioms programoms ir paprogramėms kurti (<i>Visual Basic</i> kalbos plėtinys).

1. ĮVADAS

1.1. Tyrimo objektas

Šio darbo tyrimo objektas yra dvimačiai grafiniai objektai. Jų panašumas tiriamas pagal jų formos sferinės harmonikos funkcijos deskriptorių. Dažnai aprašyti grafinį objektą papildomais tekstiniais duomenimis nepakanka – tokie grafinių objektų deskriptoriai gali apibūdinti juos netiksliai ar klaidingai. Todėl objektų panašumui tirti kuriami grafiniai jų formos deskriptoriai. Šiame darbe grafinių objektų panašumas nagrinėjamas, naudojant sferinės harmonikos funkcijos deskriptorių. Tiriama jo koeficientų parinkimo įtaka panašių formų objektų paieškai.

1.2. Darbo tikslas ir uždaviniai

Šio darbo tikslas – ištirti dvimačių grafinių objektų formos panašumą, kai jų formai atpažinti naudojamas sferinės harmonikos funkcijos deskriptorius. Atliekant bandymus su skirtingomis koeficientų reikšmėmis, siekiama išsiaiškinti, kaip atitinkamai parinktas formos deskriptorius lemia grafinių objektų panašumų suradimą ir grafinių objektų paiešką.

Tam tikslui pasiekti iškelti šie darbo uždaviniai:

- išnagrinėti galimas objektų formos atpažinimo technologijas ir algoritmus;
- išsiaiškinti, kaip kuriamas matematinis sferinės harmonikos modelis ir kaip galima jį vizualizuoti grafinėje sistemoje;
- išnagrinėti sferinės harmonikos funkcijos deskriptoriaus kūrimo bei paieškos vykdymo algoritmą;
- išnagrinėti realizuotų grafinių objektų paieškos sistemų galimybes bei objektų formos atpažinimo efektyvumą;
- sukurti sistemą, kuri AUTOCAD aplinkoje surastų panašios formos dvimačius grafinius objektus;
- išnagrinėti, kokią įtaką skirtingų sferinės harmonikos funkcijos koeficientų parinkimas daro grafinių objektų formos panašumų paieškai.

Pagrindinis uždavinys yra sukurti tokį dvimačio grafinio objekto formos atvaizdį (angl. *shape description*), kuris galėtų būti panaudojamas paprastose paieškos užklausose ir greitai pateiktų rezultatus. Tam tikslui panaudojamos sferinės harmonikos funkcijos (angl. *spherical harmonics*) [6]. Taip pat nagrinėjami grafinių objektų formų panašumai (angl. *shape similarity*).

1.3. Temos naujumas

Grafinių objektų formų panašumo tema yra gana populiari. Egzistuoja kelios sistemos, kurios nagrinėja objektų panašumą ir atlieka jų paiešką pagal formos deskriptorius – pvz., *Spherical harmonics generator in OpenGL*, *SHAPE: Spherical Harmonic Parametrization Explorer*, *Shansyn: Spherical*

Harmonic package, The Princeton Shape Benchmark ir kt. Šios sistemos kuria nuosavus deskriptorių kūrimo mechanizmus, kurie indeksuoja visus grafinius duomenų bazės objektus.

Pasirinkta tema nauja tyrimo atlikimo aplinka bei sferinės harmonikos funkcijos algoritmo realizacija. Grafinių objektų sferinės harmonikos funkcijos deskriptorius kuriamas yra grafinėje AUTOCAD programoje kaip papildoma makrokomanda – tokiu būdu supaprastinamas yra programos integravimas į grafinio paketo aplinką. Šiuo sprendimu galima nagrinėti grafinių objektų formos panašumą ir atlikti jų paiešką ne tik su paprastais grafiniais modeliais, bet ir su sudėtingesniais inžineriniais grafiniais objektais. Sferinės harmonikos funkcijos deskriptoriui kurti naudojami AUTOCAD aplinkoje sukurti objektai, todėl nereikia atsižvelgti į grafinių objektų failų formatą, ar grafinių objektų kūrimo būdą. Formos deskriptoriaus kūrimo algoritmas kuriamas, pagal originalų pasirinkto grafinio objekto viršūnių ir briaunų modelį. Panaudojus sferinės harmonikos funkcijos deskriptorių AUTOCAD aplinkoje, galima išspręsti daug problemų, susijusių su grafinių objektų aprašymu ir paieška inžinerinėje ir kompiuterinėje grafikoje.

1.4. Temos aktualumas

Pastaraisiais metais informatikoje itin daug dėmesio skiriama multimedijos duomenų analizei. Per daugelį metų buvo nagrinėjami tik dvimačių ir trimačių grafinių modelių kūrimo būdai ir algoritmai. Šio metu aktualus klausimas, kaip tokius objektus surasti ir atpažinti, kaip surasti panašumų tarp jų.

Grafinių objektų analizė naudojama šių sričių taikomosiuose programose:

- archeologijoje – ieškant panašių objektų arba jų trūkstančių dalių;
- architektūroje – identifikuojant objektus, kurie atitinka pasirinktos erdvės matmenis;
- medicinoje – planuojant ir modeliuojant chirurgines operacijas;
- kompiuterinėje grafikoje – trimačių ir dvimačių grafinių objektų paieškos sistemose;
- veido atpažinimo saugos sistemose;
- kuriant žaidimų trimačius geometrinius objektus ir jų animaciją;
- kompiuteriniame projektavime – projektuojant grafinius objektus, mechaninių detalių modelius.

Grafinių objektų galima ieškoti pagal reikšminius žodžius jų failų pavadinimuose ar juos apibūdinančiuose *metaduomenyse* (angl. *metadata*) [17]. Tačiau šis būdas yra netinkamas, jei objektai nėra aprašyti ir neturi *metaduomenų* arba *metaduomenyse* pateikiami specifiniai tiksliai objekto neapibūdinantys reikšminiai žodžiai. Galimas taip pat variantas, kai objekto *metaduomenys* visiškai neatitinka jo turinio.

Todėl naudinga yra kurti grafinių objektų formos deskriptorius. Kuriant grafinių objektų panašumą nagrinėjančias sistemas, svarbu sukurti tokį deskriptorių, kuris būtų unikalus ir vienareikšmiai apibūdintų grafinį objektą. Su kiekvienu deskriptoriumi galima atkurti originalią objekto formą. Atliekant objektų

formos paiešką, svarbu, kad objektas būtų atvaizduojamas skaitmeniniu būdu, dažniausiai atvaizduojant jo karkasą, apimtį arba taškus. Toks modelis dažnai supaprastinamas ir sukuriamas jo formos deskriptorius (angl. *shape descriptor*). Sferinės harmonikos deskriptoriaus naudojimas yra efektyvesnis – juo galima detaliau atkurti grafinio objekto formą, neatsižvelgiant į objekto poziciją darbo lauke ir jo koordinates.

1.5. Tyrimo metodai

Grafinių objektų formos panašumas tiriamas panaudojant kelis tyrimo metodus. Atliekant panašumo tyrimą, naudojami šie kiekybiniai ir kokybiniai tyrimo metodai: stebėjimo (kokybinis metodas), dokumentų analizė (kokybinis metodas), eksperimentas (kiekybinis ir kokybinis metodas) ir atvejo studija (kokybinis metodas).

1.5.1. Stebėjimo metodas

Sferinės harmonikos deskriptoriaus kūrimas tyrinėjamas yra stebėjimo metodu. Naudodamas šį metodą tyrinėtojas pats mato vykstantį procesą, stebėjimo metu gali laisvai keisti tyrimo objektą ar metodą. Pradžioje stebimas grafinio objekto mazgų modelio sudarymo procesas, vėliau – sferinės harmonikos deskriptoriaus kūrimo algoritmas. Be to, šis stebėjimo metodas padeda įvertinti ir panašių grafinių objektų paieškos efektyvumą – tik stebint būdu galima įvertinti, ar surastas objektas atitinka užklausą. Tai kokybinis tyrimo metodas, jis subjektyvus, kadangi priklauso nuo stebėtojo nuomonės ir jo pirmojo išpūdžio apie sistemos veikimą. Šis metodas nepriklauso nuo tiriančiojo gebėjimų ir pasirengimo dalyvauti tyrime. Stebėjimo rezultatai fiksuojami chronologiškai aprašant sistemos veikimą. Tam tikri stebėjimo įvykiai išryškinami yra ir klasifikuojami pagal tam tikrus kriterijus – šiuo atveju pagrindinis objekto formos panašumo įvertinimo kriterijus yra matomo vaizdo įvertinimas.

1.5.2. Dokumentų analizė

Sferinės harmonikos deskriptoriaus pranašumas įvertinamas lyginant skirtingus deskriptorius. Tam tikslui atliekama mokslinių straipsnių apie grafinių objektų formos deskriptorių kūrimą analizė. Dokumentais laikomi ne tik moksliniai straipsniai, bet ir sistemų architektūros modeliai bei sistemų techninė bei funkcinė specifikacijos, deskriptorių kūrimo pavyzdžiai ir metodologijos. Šis metodas taip pat yra priskiriamas kokybiniais tyrimo metodams, kadangi dokumentų interpretacija gali būti sudėtinga ir neobjektyvi.

1.5.3. Eksperimentas

Grafinių objektų panašumas tiriamas ir eksperimento metodu. Tam tikslui sukuriama dvi panašios tiriamųjų objektų grupės, iš kurių bus kuriamos grafinių objektų paieškos užklausos. Abiejų grupių užklausos tiriamos su skirtingų imčių duomenų bazės lentelėmis. Atlikus tam tikrą bandymų skaičių galima analizuoti gautus rezultatus ir lyginti abiejų grupių objektų panašumą bei jų suradimo laiką ir kiekį. Eksperimentas yra kiekybinis ir kokybinis tyrimo metodas, jo rezultatai būna patikimesni, jeigu jo vykdymo metu atliekami keli bandymai su skirtingomis pradinėmis sąlygomis. Šiuo atveju skiriasi abiejų grupių sferinės harmonikos funkcijos deskriptoriaus koeficientų reikšmės, duomenų bazių įrašų kiekis.

1.5.4. Atvejo studija

Šio tyrimo metodo atveju nagrinėjama konkreti praktinė eksperimento situacija – sferinės harmonikos funkcijos deskriptoriaus kūrimas su tam tikromis koeficientų reikšmėmis. Pagal gautus rezultatus šio atvejo išvados yra apibendrinamos visiems tokio tipo atvejams ir situacijoms. Tai kokybinis analizės metodas.

1.6. Mokslinė darbo vertė

Šis darbas remiasi daugelio mokslinių straipsnių, kuriuose nagrinėjamos grafinių objektų formos deskriptorių kūrimo galimybės, analize. Dauguma straipsnių remiasi eksperimentais, atliktais su *Princeton Shape Benchmark* grafinių objektų paieškos sistema. Tačiau analizuojamos ir kitos sistemos: *Spherical harmonics generator in OpenGL*, *SHAPE: Spherical Harmonic Parametrization Explorer*, *Shansyn: Spherical Harmonic package* ir kt.. Siekiant kuo efektyviau pritaikyti straipsniuose siūlomus algoritmus bei sferinės harmonikos deskriptoriaus kūrimo metodus, analizuojamos taip pat sukurtų sistemų techninės bei funkcinės specifikacijos, deskriptorių kūrimo pavyzdžiai. Naudotos literatūros paskelbimo laikas: 1998 m. – 2008 m.

1.7. Darbo aprobacija

Pagal sukurtą grafinių objektų formos lyginimo ir paieškos programos veikimą, atliktus eksperimentus bei gautus rezultatus 2010 m. balandžio 15 d. 13-ojoje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Mokslas – Lietuvos ateitis. Kompiuterinė grafika ir projektavimas.“ (angl. „*Science – Future of Lithuania. Computer Graphic and Engineering.*“) buvo paskelbtas mokslinis straipsnis: „*Sferinės harmonikos funkcijos panaudojimas, kuriant dvimačių grafinių modelių deskriptorių*“. Mokslinis straipsnis pateikiamas 5 priede.

2. PROBLEMOS ANALIZĖ IR FORMULAVIMAS

Nagrinėjant grafinių objektų formos panašumą, reikia susikurti atitinkamą formos deskriptorių. Deskriptorius gali taip pat būti analizuojamas pagal jo kintamųjų reikšmių įtaką gaunamiems rezultatams. Tam tikslui būtina įgyvendinti šiuos etapus:

- tinkamai apibrėžti grafinio objekto viršūnių ir briaunų modelį;
- sukurti dvimačių grafinių objektų formos deskriptoriaus algoritmą;
- palyginti algoritmo vykdymo rezultatą su turimais ir duomenų bazėje saugomais grafinių objektų formos deskriptoriais;
- pateikti labiausiai užklausa atitinkančius rezultatus, atlikti jų analizę ir palyginimą pagal iš anksto nustatytus kriterijus.

Svarbu taip pat apibrėžti, kas yra grafinio objekto forma ir kokiais duomenimis bei metodais galima ją nusakyti.

Objekto forma yra objekto siluetas ar karkasas. Jos apibrėžimui naudojamas formos apibūdinimo metodas, kuris sukuria formos deskriptoriaus vektorių (angl. *shape descriptor vector*) [19]. Jo tikslas – sukurti tokį deskriptorių, kuris būtų unikalus ir vienareikšmiai apibūdintų grafinį objektą. Atliekant objektų formos paiešką, algoritmo pirminiai duomenys yra tam tikros objektų formos. Paieška atliekama lyginant grafinius objektus vieną su kitu.

Formos analizė (angl. *shape analysis*) – automatinė geometrinių formų analizė, pagrįsta panašių objektų formų atrinkimu. Objektas turi būti pateikiamas skaitmeniniu būdu, dažniausiai atvaizduojant jo karkasą (angl. *boundary representation*), apimtį (angl. *constructive solid geometry*) arba taškus (angl. *point clouds*). Toks modelis dažnai supaprastinamas ir sukuriamas jo formos deskriptorius (angl. *shape descriptor*). Su kiekvienu deskriptoriumi galima atkurti originalią objekto formą.

2.1. Grafinių objektų klasifikavimas

Grafiniai objektai ir jų analizės algoritmai yra skirtingai rūšiuojami, priklausomai nuo pasirinktų klasifikavimo kriterijų. Pavlidis pasiūlyto klasifikatoriaus esmė – objektų formos apibrėžimas nusakant jų kraštinių ar sienų taškus [19]. Tokio klasifikavimo rezultatas yra dvi objekto klasės: išorinės objekto sienos (angl. *external boundary*) bei objekto vidus (angl. *global or internal part*).

Kitas objektų formos apibrėžimo algoritmų klasifikavimo pavyzdys remiasi algoritmo rezultatų pateikimu. Jeigu pateikiami neskaitiniai rezultatai, algoritmas remiasi erdvės srities technika (angl. *space-domain technique*). Jeigu rezultatas pateikiamas kaip skaitinė reikšmė, jam naudojamos skaliarinės transformacijos metodas (angl. *scalar transformation technique*), kuris pateikia rezultatus kaip skaliarus ar vektorius.

Objektai gali būti taip pat klasifikuojami pagal išsaugotą apie juos informaciją. Metodai, kurie leidžia atkurti objekto formą pagal jo deskriptorių, yra vadinami informaciją išsaugančiais metodais (angl. *information preserving methods*). Jeigu deskriptorius leidžia tik dalinai atkurti objekto formą, tada jis naudojamas būna informacijos neišsaugojančiuose metoduose (angl. *information non-preserving techniques*).

Formos deskriptoriai gali būti skirstomi pagal objektų formos transformacijos lygį. Dauguma grindžiama yra atitikimo (angl. *congruency*) principu – tokie patys ar panašūs objektai turi turėti tokį patį deskriptorių. Tai sferinės harmonikos funkcija pagrįsti deskriptoriai.

Kiti formos deskriptoriai grindžiami yra izometrija – jie vadinami būdingaisiais formos deskriptoriais (angl. *intrinsic shape descriptors*). Jie gali būti taikomi objektams, kurių forma gali deformuotis – pavyzdžiui, skirtingiems stovintiems žmonėms atpažinti.

2.2. Formos deskriptoriaus kokybiškumo įvertinimas

Svarbi formos atpažinimo algoritmų problema – atitinkamo ir efektyvaus formos deskriptoriaus parinkimas. Jeigu algoritme naudojamas netinkamas deskriptorius, jis gali įtakoti rezultatų kiekį ir jų kokybiškumą. Kuriant tam tikrą formos deskriptorių, naudinga vadovautis šiais kriterijais (Marr ir Nishihara kriterijai) [19]:

- pasiekiamumas (angl. *accessibility*) – nusako deskriptoriaus skaičiavimo sudėtingumo lygį;
- unikalumo laipsnis (angl. *scope of uniqueness*) – nusako, kokia grupė grafinių objektų gali būti apibūdinama šiuo deskriptoriumi;
- stabilumas (angl. *stability*) ir jautrumas (angl. *sensitivity*) – nusako, kaip deskriptorius reaguoja į nedidelius nagrinėjamo objekto formos pakeitimus.

Galimi taip pat kiti efektyvaus deskriptoriaus kūrimo kriterijai:

- gausus vietinis palaikymas (angl. *rich local support*) – pagal šį kriterijų, kuriamas deskriptorius turi teikti daug informacijos apie duotą grafinį objektą ir gali būti apskaičiuojamas lokaliai;
- lengvas išplėtimas ir papildymas (angl. *smooth extension and subsumption*) – šis kriterijus užtikrina, kad lokalūs deskriptoriai galėtų būti naudojami kaip globalūs;
- skleidimas (angl. *propagation*) – lokalius tam tikrų objekto dalių deskriptorius apjungia į viso objekto globalų deskriptorių.

3. TEORINIS PAGRINDIMAS

Šioje dalyje aptariami yra grafinių objektų formų atpažinimo algoritmai bei jų vertinimo kriterijai. Be to, detaliai aprašomas sferinės harmonikos funkcijos kūrimo algoritmas. Išnagrinėjamas yra sferinės harmonikos funkcijos matematinis modelis, pristatoma jo grafinė vizualizacija. Aptariamas taip pat sferinės harmonikos deskriptoriaus formų invariantiškumas bei formų histogramos – jų dėka grafinių objektų panašumo algoritmai veikia efektyviau..

3.1. Formų panašumo atpažinimo algoritmai ir jų savybės

Pagrindinis formų atpažinimo algoritmų efektyvumo kriterijus yra vizualus algoritmo vartotojo įvertinimas. Pagal vizualų įvertinimą, objektų formas galima skirstyti į: solidžias formas (angl. *solid form*), paviršių objektus (angl. *surface form*), kontūrus (angl. *outline form*), iliustracijas (angl. *pictorial form*), planus ir plokščias erdvių projekcijas (angl. *plan form and projected form*), perspektyvas (angl. *perspective form*), nerealias formas (angl. *nonsense form*), paprastas geometrines formas (angl. *plane and solid geometric forms*) [20]. Visas šias grupes galima klasifikuoti į tris klases:

- realių objektų klasę – kietų kūnų ir paviršių formas;
- realių objektų atvaizdavimų klasę – kontūrai, iliustracijos, planai, perspektyvinės formos;
- abstrakčių objektų klasę – projekcijos, nerealias formas, paprastos geometrinės formos.

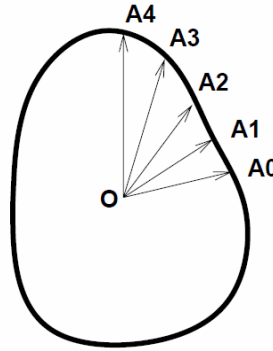
Be vartotojo vizualaus įvertinimo, nagrinėjant grafinių objektų formų panašumą naudojami ir kompiuterinės grafikos metodai. Jie įvertina objektų kontūrą (angl. *shape from contour*), geometriją (angl. *shape from geometry*), apšvietimą (angl. *shape from shading*) ir tekstūrą (angl. *shape from texture*).

3.1.1. Objekto skeleto transformacijos metodai – dvimačio objekto atvaizdavimas vienmate struktūra

Objekto skeleto transformacijos algoritmai dažniausiai yra sudaryti iš dviejų etapų. Pirmojo etapo metu, iš dvimačio objekto formos kuriama vienmatė funkcija. Antrojo etapo metu, vienmatė funkcija naudojama dvimačio objekto formai atkurti. Vienmatės funkcijos panaudojimas objekto apibūdinimui gali būti realizuojamas dviem būdais: pagal Fourier transformaciją (angl. *Fourier transform of the characteristic function*) arba pagal stochastinį procesų modeliavimą (angl. *stochastic process modeline of the characteristic function*) [19].

Norint apibūdinti dvimačio objekto formą, galima pasitelkti jo centro bei kraštinės taško trigonometrinę funkciją (Zahn ir Roskies bei Bennet ir McDonald metodas). Tokiu atveju skaičiuojamas kampo tarp figūros centro ir dviejų objekto kraštinės taškų tangento trigonometrinė išraiška. Tokiu būdu paskaičiuojamas objekto kontūro taškų nuotolis nuo jo centro. Kitas būdas yra skaičiuoti objekto formos

centrinę funkciją (angl. *the shape centroid*). Funkcijos reikšmės yra nuotoliai tarp objekto centro ir jo kraštinių taškų. Kampas tarp atskirų parinktų formos kontūro taškų yra vienodas.



1 pav. Centrinės funkcijos skaičiavimas

3.1.1.1. Fourierio kontūro transformacija

Dvimačio objekto atvaizdavimui vienmate funkcija gali būti panaudojama ir *Fourierio* transformacija: $F(\omega) = F(f)(t)$, kur $F(\omega)$ - funkcijos reikšmės, $F(f)(t)$ - transformuotos funkcijos reikšmės laiko atžvilgiu t . Tokiu atveju gauta objekto kontūro centrinė funkcija yra transformuojama pasitelkus *Fourierio* transformaciją:

$$f(\xi) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{-2\pi i x \xi} dx, \quad (1)$$

kur ξ - transformacijos argumentas, žymintis jos dažnį, x – kitimas laike, i – fiktyvus dydis ($i^2 = -1$).

Tokiu būdu apskaičiuoti koeficientai naudojami kaip duoto grafinio objekto deskriptoriai. Objektas transformuojamas pasitelkus *Fourierio* transformaciją, kadangi siekiama atsižvelgti į visus galimus jo pasukimo kampus ir pozicijas.

3.1.1.2. Stochastiniai metodai

Nagrinėjamo objekto padėties problema gali būti išspręsta panaudojant stochastinį CAR modelį (angl. *circular autoregressive model* - CAR) [19]. Tokiu atveju centrinė funkcija papildoma nežinomais parametrais bei nepriklausoma trikdžių funkcija (angl. *independent noise sequence*). Šį metodą galima užrašyti tokiu būdu:

$$r_t = \alpha + \sum_{j=1}^m \theta_j r_{t-j} + \sqrt{\beta \omega_t}, \quad (2)$$

kur ω – nepriklausomas trikdžių koeficientas, o $\{\alpha, \theta_j, \dots, \theta_m, \beta\}$ – nežinomi parametrai, kuriuos reikia pasirinkti.

Panaudojus maksimalią tikimybę (angl. *maximum likelihood*), priimama, kad θ_i parametrai yra transliacija, pasukimas ir skalės pakeitimas. Tokiu atveju formos deskriptorius skaičiuojamas yra pagal tokią išraišką:

$$[\theta_1, \dots, \theta_m, \alpha / \sqrt{\beta}]^T. \quad (3)$$

3.1.2. Erdvinės srities technikos

Norint supaprastinti panašių objektų paiešką, galima pasitelkti jų dvimačių atvaizdavimų lyginimu. Tokiu atveju pati objekto forma nėra lyginama. Lyginami tik jo erdvės taškai.

3.1.2.1. Grandinės kodas (angl. *Chain Code*)

Apibendrintas grandinės kodo metodo atvejis pateikiamas paveikslėlyje. Aplink A mazgą pateiktos kitų mazgų reikšmės paskaičiuojamos pagal laikrodžio rodyklę. Rodyklė a_i yra nukreipta tiesės atkarpa. Tokiu atveju grandinė yra rodyklių seka $A = a_1, a_2, \dots, a_n$, turinti savo ilgį bei nuotolį tarp dviejų mazgų. Panaudojus šį metodą galima sukurti deskriptorių, kuris nepriklauso nuo objekto transliacijos, pasukimo ir skalės pakeitimo.

	33	32	31	30	29	28	27	
	34	14	13	12	11	10	26	
	35	15	3	2	1	9	25	
	36	16	4	A	0	8	24	
	37	17	5	6	7	23	47	
	38	18	19	20	21	22	46	
	39	40	41	42	43	44	45	

2 pav. Bendras grandinės kodo atvejis

3.2. Sferinės harmonikos funkcijos grafinių objektų formos deskriptorius

3.1. skyriuje minėti deskriptoriai dažniausiai taikomi dvimačiams grafiniams objektams. Jie neefektyvūs, kadangi reikalauja objekto pozicijos nustatymo ir jo apibrėžimo koordinačių sistemos atžvilgiu. Nagrinėjant trimačių objektų panašumą, naudojamas dažniausiai deskriptorius, kuris sukuriamas sferinėje koordinačių sistemoje pasitelkus sferinės harmonikos funkciją. Toks deskriptorius efektyvesnis, kadangi jis apskaičiuojamas iš anksto. Kiekvienas objektas turi savo unikalų deskriptorių, kuris vėliau yra lyginamas su ieškomo panašaus objekto deskriptoriumi – tokiu atveju nereikia nagrinėti pavienių grafinių objektų taškų, paieška ir lyginimas vyksta sparčiau.

Žemiau pateikiamas funkcijos matematinis modelis bei grafinis vizualizavimas. Aprašomas taip pat funkcijos kūrimo algoritmas.

3.2.1. Matematinis sferinės harmonikos funkcijos modelis

Sferinės harmonikos funkcijos – tokios funkcijos, kurios yra *Laplace'o* diferencialinės lygties sprendiniu [6]. Jos užrašomos su sferine simetrija:

$$\left[\frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} + \lambda \right] Y(\theta, \phi) = 0, \quad (4)$$

kur λ – separacijos konstanta, o $\{\theta, \phi\}$ - sferinės koordinačių sistemos konstantos.

Skaičiavimų dėka galima sferinės harmonikos funkcijas užrašyti tokiu pavidalu [6]:

$$Y_{lm}(\theta, \phi) = (-1)^m \left[\frac{(2l+1)(l-m)!}{4\pi(l+m)!} \right]^{1/2} P_l^m(\cos \theta) e^{im\phi}, \quad (5)$$

kur l – sveikasis skaičius, m – sveikasis skaičius, mažesnis kaip m , P_l^m - Legendre'o funkcijos. Neigiamom m reikšmėms $Y(\theta, \phi)$ užrašoma:

$$Y_{l,-m}(\theta, \phi) = (-1)^m Y_{lm}(\theta, \phi). \quad (6)$$

Kelios pirmosios sferinės harmonikos reikšmės pateikiamos lentelėje (žr. 1 Lentelė) [6].

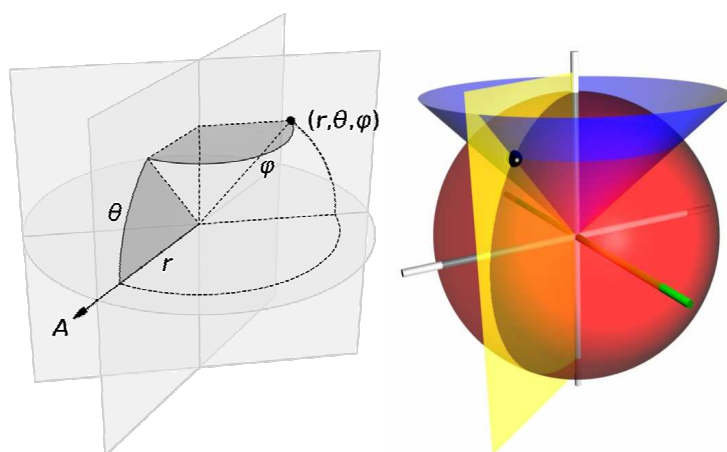
1 lentelė. Kelios sferinės harmonikos funkcijos reikšmės

l	m	$Y_{lm}(\theta, \phi)$
0	0	$\frac{1}{\sqrt{4\pi}}$
1	0	$\sqrt{\frac{3}{4\pi}} \cos \theta$

1	± 1	$\mp \sqrt{\frac{3}{8\pi}} \sin \theta e^{\pm i\phi}$
2	0	$\sqrt{\frac{5}{4\pi}} (\cos^2 \theta - \frac{1}{2})$
2	± 1	$\mp \sqrt{\frac{15}{8\pi}} \cos \theta \sin \theta e^{\pm i\phi}$
2	± 2	$\sqrt{\frac{15}{32\pi}} \sin^2 \theta e^{\pm 2i\phi}$
3	0	$\sqrt{\frac{7}{4\pi}} \left(\cos^3 \theta - \frac{3}{2} \cos \theta \sin^2 \theta \right)$
3	± 1	$\mp \sqrt{\frac{21}{64\pi}} (4 \cos^2 \theta \sin \theta - \sin^3 \theta) e^{\pm i\phi}$
3	± 2	$\sqrt{\frac{105}{32\pi}} \cos \theta \sin^2 \theta e^{\pm 2i\phi}$
3	± 3	$\mp \sqrt{\frac{35}{64\pi}} \sin^3 \theta e^{\pm 3i\phi}$

3.3.1 Grafinė sferinių harmonikų interpretacija

Sferinės harmonikos funkcijos yra kintamųjų θ ir ϕ kintamųjų funkcijomis sferinėje atskaitos sistemoje. Sferinė koordinačių sistema, tai tokia sistema, kurioje pasirinkto taško padėtis nusakoma trimis koordinatėmis: r - radialiniu taško atstumu nuo koordinačių sistemos centro, θ – pakėlimo kampu nuo horizontalios koordinačių sistemos atskaitos plokštumos iki taško, ϕ – kampu nuo vertikalios koordinačių sistemos atskaitos plokštumos iki taško.



3 pav. Sferinės koordinačių sistemos schema ir trimatis modelis. Raudona sfera žymi taško (r) nuotolį nuo koordinačių sistemos centro, geltona plokštuma padeda nusakyti (θ) kampą tarp horizontalios koordinačių sistemos atskaitos plokštumos ir taško, violetinis išpjovos paviršius padeda nustatyti (ϕ) kampą tarp vertikalios koordinačių sistemos atskaitos plokštumos ir taško

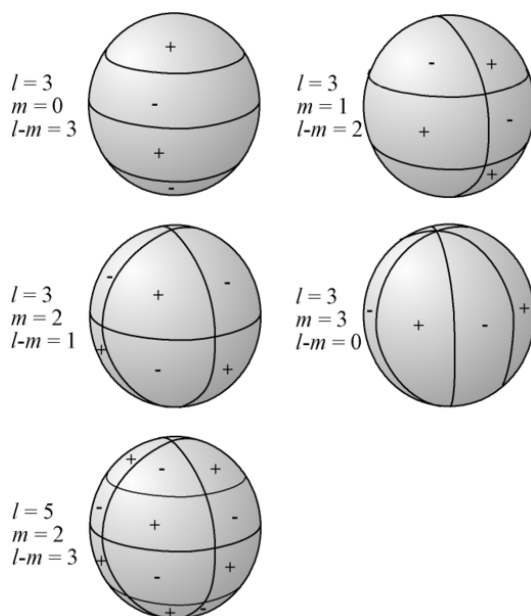
Sferinės koordinatų sistemos taškus galima vaizduoti ir paprastoje Dekarto koordinatų sistemoje. Norint atvaizduoti jas Dekarto atskaitos sistemoje, reikia harmonikų paviršius apsukti aplink r spindulio sferą:

$$x = r \cos \theta \sin \varphi, y = r \sin \theta \sin \varphi, z = r \cos \theta. \quad (7)$$

Sferinės harmonikos funkcijos gali būti vizualizuojamos, panaudojant jų orbitalinius mazgus (angl. *orbital node, nodal lines*) [6]. Orbitaliniai mazgai – tai erdvės taškų rinkinys, kuriame sferinės harmonikos funkcija jau neturi savo reikšmių (jau nebeegzistuoja). Tokiu atveju orbitalinius mazgus galima suvokti kaip duoto objekto sferinės harmonikos funkcijų ribą.

Mazgų orbitos kuriamos apskritimo pagrindu: vieni jos mazgai yra suvokiami kaip platumos (angl. *latitudes*) taškai, kiti – kaip ilgumos (angl. *longitudes*) [20]. Kiekvienas mazgas gali turtėti tam tikrą apskritimo formos orbitų skaičių, kuris apskaičiuojamas, kuriant nepriklausomas linijas nuo nulinės platumos reikšmės ir ilgumos kryptimis. Platumos kryptimi *Legendre*’o funkcijos prilyginamos yra $l-|m|$ nulinėms reikšmėms, o ilgumos kryptimi trigonometrinės $\sin$ ir $\cos$ funkcijos prilyginamos yra $2|m|$ nulinėms reikšmėms.

Kai sferinės harmonikos funkcijos m reikšmės lygios 0, sferinės harmonikos funkcija nepriklauso nuo atskaitos sistemos ilgumos reikšmių – orbitalinės linijos atvaizduojamos zonomis (angl. *zonal spherical harmonics*). Kai $l=|m|$, sferinės harmonikos funkcija nepriklauso nuo platumos reikšmių – orbitalinės linijos atvaizduojamos sektoriais (angl. *sectoral spherical harmonics*) [6]. Visais kitais atvejais funkcijos atvaizduojamos sferos dalimis (angl. *tesseral spherical harmonics*) [20].



4 pav. Grafinis sferinės harmonikos funkcijų atvaizdavimas sferos orbitalinėmis linijomis ir mazgais. Jeigu funkcijos $m=0$, orbitalinės linijos išsidėsto horizontalia platumos kryptimi, jeigu $l=|m|$ - orbitalinės linijos išsidėsto vertikalio ilgumos kryptimi

3.2.3. Sferinės harmonikos funkcijos deskriptoriaus kūrimo algoritmas

Objekto deskriptorius kuriamas šiais etapais[6][9][15] [14]:

1. Poligoninės plokštumos atvaizduojamos baigtiniame $2R \times 2R \times 2R$ volumetrinių pikselių (angl. *voxel* – *volumetric pixel*) tinkle (angl. *rasterization*). Kiekvienam volumetriniam pikseliui, kuriame yra tam tikras poligoninės plokštumos ilgis, priskiriama reikšmė 1, jeigu plokštumos jame nėra – 0. Įprastai naudojama $R \sim 32$.

Siekiant supaprastinti transformacijos skalę, modelis perkeliamas taip, kad jo centrinis taškas yra (R, R, R) taške, ir atitinkamai sumažinamas, kad atstumo vidurkis nuo nenulinių volumetrinių pikselių ir objekto centro būtų $R/2$. Tokie objekto formos atvaizdavimo metodai supaprastina objekto paiešką, kadangi nesusikoncentruojama ties tam tikrom objekto savybėmis, o tik ties objektų panašumu.

2. Volumetrinių pikselių tinklas nagrinėjamas kaip binarinė realių reikšmių funkcija. Ji apibrėžiama kaip taškų, kurių ilgis ne didesnis kaip R , rinkinys. Tokia funkcija užrašoma sferinėse koordinatėse (angl. *spherical coordinates*):

$$f(r, \theta, \phi) = \text{VOXEL}(r \sin \theta \cos \phi + R, r \cos \theta + R, r \sin \theta \sin \phi + R), \quad (8)$$

kur $r \in [0; R], \theta \in [0, \pi], \phi \in [0; 2\pi]$.

Skirtingi spinduliai apribojami, sukuriant sferinių funkcijų kolekciją (angl. *collection of spherical functions*) $\{f_0, f_1, \dots, f_R\}$:

$$f_r(\theta, \phi) = f(r, \theta, \phi). \quad (9)$$

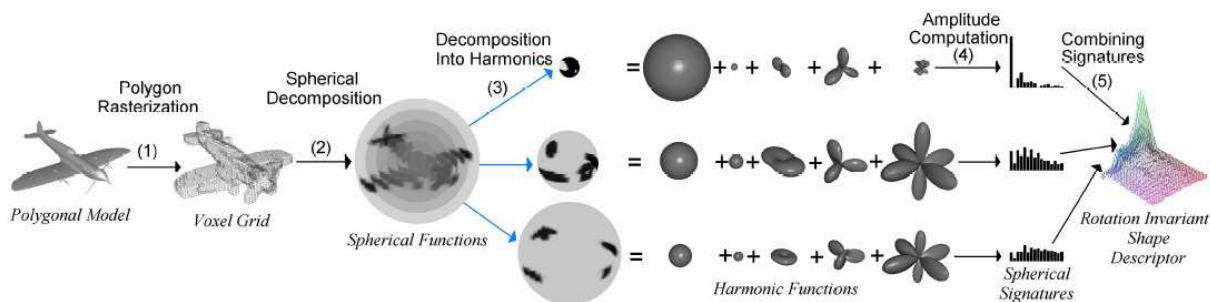
3. Kiekviena funkcija f_r išreiškiama kaip skirtingų dažnių suma:

$$f_r(\theta, \phi) = \sum_m f_r^m(\theta, \phi), \quad (10)$$

$$\text{kur } f_r^m(\theta, \phi) = \sum_{n=-m}^m a_{mn} \sqrt{\frac{(2m+1)}{4\pi} \frac{(m-|n|)!}{(m+|n|)!}} P_{mn}(\cos \theta) e^{in\phi}. \quad (11)$$

Funkcija f_r^m yra funkcijos f_r projekcija sferinės funkcijos plokštumoje.

4. Skirtingi nesumažinti atvaizdavimai yra fiksuojami prieš pradedant pasukimą ir pasukimas nepakeičia norminės funkcijos L_2 . Jeigu funkcija f_r pasukama, jos reikšmė $\|f_r^m\|$ nepakinta. Nekintanti f_r funkcijos išraiška užrašoma skaliarų kolekcija $\{\|f_r^0\|, \|f_r^1\|, \dots\}$.
5. Šių skirtingų funkcijos išraiškų kombinacijos skirtingų spindulių atžvilgiu sukuria dvimatę nekintančią pasukimo išraišką – trimačių modelių sferinės funkcijos deskriptorių (angl. *spherical harmonics descriptor*), kurios reikšmė priklauso nuo indekso (r_0, m_0) ir m_0 -ojo dažnio ilgio, nuo f funkcijos ribos iki sferos, kurios spindulys lygus r_0 .



5 pav. Sferinės harmonikos funkcijos deskriptoriaus skaičiavimo schema.

Norint palyginti du sferinės funkcijos deskriptorius (angl. *spherical harmonics descriptor*), reikia paskaičiuoti Euklido atstumą (angl. *Euclidean distance*) tarp jų [30][15]. K geriausiai atitinkančių užklausą rezultatų paieška yra ekvivalenti K artimiausių kaimynų daugiadimensinėje erdvėje problemos (angl. *K nearest – neighbors problem in high-dimensional space*) sprendimui. Tačiau galima atvaizduoti šį uždavinį ir vienos dimensijos erdvėje. Tai vykdoma dviem būdais. Pirmuoju būdu apskaičiuojama apatinė nuotolio tarp užklausos modelio ir visų kitų duomenų saugyklos modelių riba – surandama M artimiausių kaimynų erdvės projekcijoje į koordinačių ašis ($M \gg K$). Antruoju būdu paskaičiuojamas realus atstumas iki modelių, išrikiuotų pagal apatinę nuotolio ribą. Skaičiavimas sustabdomas, kai atstumas iki einamojo K -tojo artimiausio modelio yra mažesnis nei likusiųjų modelių apatinė riba. Skaičiuojant realų atstumą, pradžioje naudojama pagrindinė sferinė funkcija – tokiu būdu atrenkami tik labiausiai užklausą atitinkantys rezultatai.

3.2.4. Sferinės harmonikos funkcijos deskriptoriaus invariantiškumas

Svarbi grafinių objektų panašumo tyrimo problema – modelių atpažinimas, kai jie yra atvaizduojami skirtingose perspektyvose. Galimi du jos sprendimo būdai [16]:

- kiekvienas modelis turi būti atvaizduojamas panaudojant skirtingų pasukimų deskriptorių (angl. *rotation invariant descriptor*);
- kiekvienas modelis yra apibūdinamas deskriptoriumi, kuris priklauso nuo pasukimo kampo; toks modelis transformuojamas taip, kad turėtų įprastinę koordinačių sistemos būseną.

Siekiant realizuoti trimačių grafinių modelių paiešką, svarbu išskirti du paieškos algoritmo realizavimo etapus. Pirmojo etapo metu kiekvienam duomenų bazės grafiniam objektui priskiriama yra tam tikra informacija, apibūdinanti pagrindines modelio savybes ir deskriptorių. Antrojo etapo metu paieškos užklausos modelio duomenys lyginami su duomenų bazės objektais ir atrenkami geriausiai paieškos užklausą atitinkantys rezultatai.

Abu šiuos metodus galima realizuoti dviem skirtingais būdais [14]:

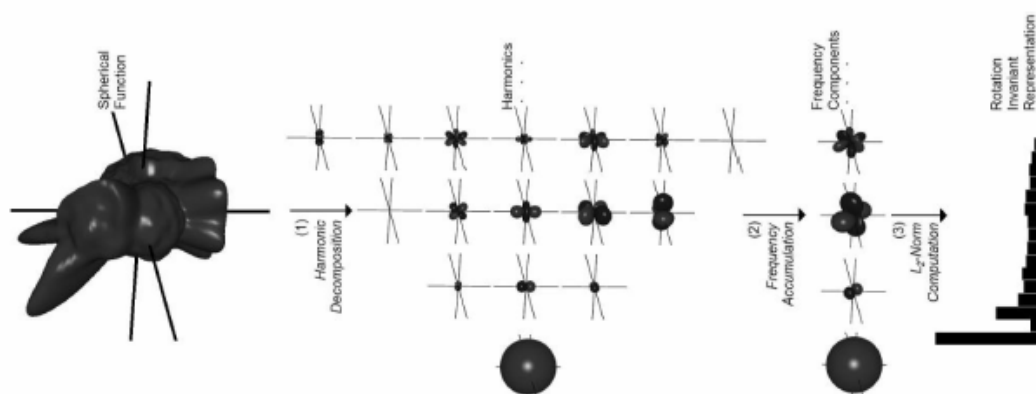
- atliekant normalizaciją (angl. *normalization*) – du grafiniai objektai patalpinami yra įprastinėje koordinačių sistemoje; tam tikslui jie gali būti pasukamas, ar gali būti pakeičiama jo skalė; atlikus tokias objektų transformacijas objektai gali būti lyginami vienas su kitu.
- užtikrinant atvaizdavimo įvairiapusiškumą (angl. *invariance*) – objektų formos apibūdinamos daugialypišku deskriptoriumi; tokiu atveju deskriptorius nusako objekto savybes įvairiose skirtingose būsenose, todėl galima juos lyginti vieną su kitu, nelyginant pačių modelių būsenos.

Sferinės harmonikos atvaizdavimo metodas (angl. *Spherical Harmonic Representation*) užtikrina, kad skirtingų atvaizdavimų objektų deskriptoriai nepriklauso nuo jų vaizdavimo kampo. Šio algoritmo panaudojimas leidžia taikyti jį daugeliui jau egzistuojančių deskriptorių, be to jis žymiai efektyvesnis nei objekto normalizacija.

Sferinės harmonikos funkcija naudojama yra šiems deskriptoriams [16]:

- Išplėstinis Gauso atvaizdavimui (angl. *The Extended Gaussian Image*) – apibūdina normalinį Gauso skirsnio pasiskirstymą modelio erdvėje;
- Formos histogramoms (angl. *Shape Histograms*) – apibūdina taškų pasiskirstymą modelio viduje;
- Sferinio išplėtimo funkcijoms (angl. *Spherical Extent Functions*) – apibūdina maksimalų sferinės funkcijos išplėtimą originalaus objekto ribose;
- Refleksyvos simetrijos deskriptoriams (angl. *Reflective Symmetry Descriptors*) – nagrinėja objekto dalių panašumą viena kitos atžvilgiu;
- Funkhouserio vokselio deskriptoriui (angl. *The Voxel Description of Funkhouser*) – sukuria modelio deskriptorių pagal eksponentinę Euklido atstumo transformaciją (angl. *Euclidean Distance Transformation*).

Visiems jiems galima taikyti pasukimo algoritmą, kurio dėka galima bus apibūdinti objektų deskriptorius priklausomai nuo tų objektų padėties.



6 pav. Sferinės harmonikos deskriptoriaus pasukimas skaičiuojamas šiais etapais: (1) modeliui apskaičiuojamos sferinės harmonikos, (2) harmonikos sumuojamos į vieną sferinės harmonikos funkciją, (3) kiekvienam funkcijos komponentui apskaičiuojamas pasukimo įvairialypis atvaizdavimas (angl. *Rotation Invariant Representation*)

3.3 The Princeton Shape Benchmark – grafinių objektų panašumo tyrimo bei jų paieškos sistema

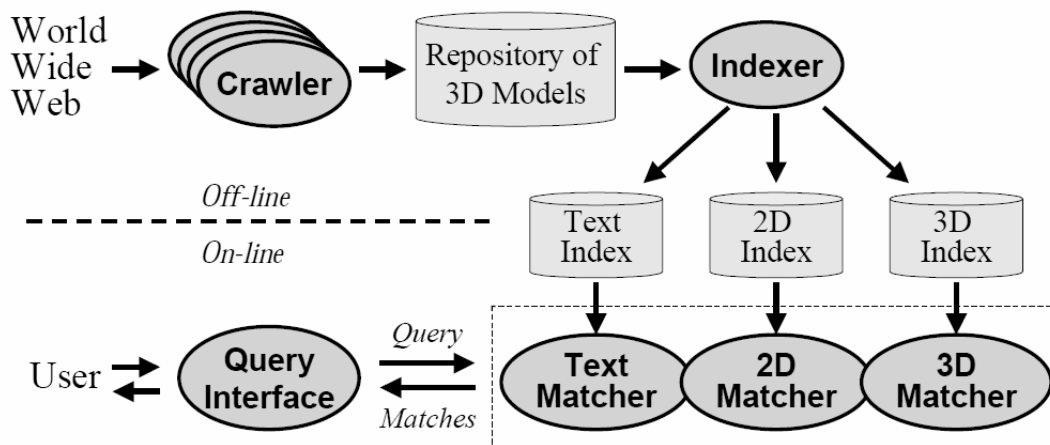
Norint atlikti objektų panašumo tyrimą bei jų paiešką, reikia turėti pakankamai didelę dvimačių ir trimačių grafinių objektų saugyklą. Tos saugyklos objektai - grafiniai modeliai, kurių kiekvienas apibūdinamas tam tikru sferinės harmonikos funkcijos deskriptoriumi. Kita būtina sąlyga: atitinkamas deskriptorių kūrimo mechanizmas, kuris suindeksuoja visus duomenų bazės grafinius objektus. Jeigu mechanizmas sukurtas taisyklinga, jis sukuria formos deskriptorių, kuris yra unikalus ir pakankamai tiksliai apibūdina dvimačio arba trimačio grafinio objekto formą.

Jeigu antrąją sąlygą tenkina keliolika sistemų (pvz., *Spherical harmonics generator in OpenGL*, *SHAPE: Spherical Harmonic Parametrization Explorer*, *Shansyn: Spherical Harmonic package* ir kt.), tai surasti didelę ir gerai suindeksuotą grafinių objektų duomenų bazę yra gana sudėtingas uždavinys. Viena tokia duomenų saugykla – *The Princeton Shape Benchmark* sistema.

3.3.1 PSB apžvalga

Sistemos veikimas pagrįstas keturiais etapais [9][6]: peržiūrėjimas (angl. *crawling*), indeksavimas (angl. *indexing*), užklausų kūrimas (angl. *querying*), rezultatų susiejimas (angl. *matching*). Pirmi du žingsniai vykdomi tam, kad sukaupti didžiulę grafinių objektų duomenų saugyklą, kiti realizuojami kiekvieną kartą vartotojui vykdant paiešką.

1. Peržiūrėjimas – trimačių objektų duomenų bazė sukurta peržiūrėjus pasaulinį žiniatinklį. Aukštos kokybės 3D grafiniai objektai sudaro nedidelę trimačių modelių duomenų dalį, todėl duomenų bazę sudaro 17.834 VRML modelių.
2. Indeksavimas – kiekvienam trimačiam objektui priskiriamas tam tikras indeksas, kuris bus naudojamas ne tik tekstinėse užklausose, bet ir formos užklausose. Kiekvienas grafinis objektas gauna savo indeksą, kuris yra sukuriamas pagal sferinę funkciją (angl. *spherical harmonics*).
3. Užklausų kūrimas – sistema leidžia vartotojui interaktyviai ieškoti trimačių objektų. Ji palaiko tekstines, dvimačių ir trimačių objektų užklausas. Visų šių rūšių užklauskos užtikrina didesnę paieškos rezultatų.
4. Rezultatų susiejimas – kiekvienai užklausiai paieškos sistema naudoja tam tikrą indeksą, su kuriuo gražinama 16 trimačių objektų, kurie geriausiai atitinka paieškos užklausą. Panaudotas metodas gražina rezultatus per mažiau kaip 0.25 sekundės.



7 pav. Sistemos modelis ir jos veikimas

3.3.2 Objektų formos užklauso

Paprasčiausias objektų formos užklauso kūrimo metodas yra nagrinėti egzistuojančius trimačius modelius ir ieškoti jiems panašių. Ši paieškos sistema palaiko tokį metodą dviem būdais.

Pirmuoju atveju vartotojas gali lokaliai pasirinkti tam tikros formos grafinį objektą iš savo kompiuterio ir sistema ieško trimačių objektų, kurie turi tokią pačią formą. Šis būdas naudingas, jei norima rasti tos pačios formos objektus arba norima surasti specifinės formos objektus.

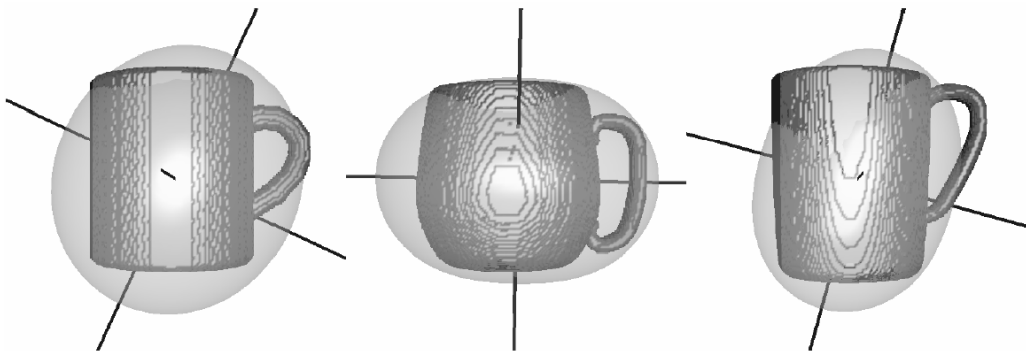
Antruoju atveju – vartotojas gali ieškoti tiesiog panašaus grafinio objekto. Tada randamos tam tikros objektų klasės ar specifinės grupės.

Pagrindinė problema kuriant trimačių objektų formos paieškos užklauso yra sukurti atitinkamą formos atvaizdavimą sistemoje (angl. *shape descriptor*) [16]. Pagal tokį atvaizdavimą sukuriamas objekto indeksas ir galima efektyviai vykdyti jam geometrinių objektų susiejimą (angl. *geometric matching*). Formos atvaizdavimas turėtų tenkinti šias savybes [15]:

- turi būti nesudėtingai apskaičiuojamas;
- turi būti paprasta jį saugoti;
- turi būti nesudėtinga juo aprašytus objektus indeksuoti;
- jo reikšmės negali priklausyti nuo panašių objekto transformacijų;
- negali priklausyti nuo išorinių aplinkos trikdžių;
- turi būti nepriklausomas nuo trimačių objektų atvaizdavimo;
- negali priklausyti nuo objekto skalės skirtumų.

Deja, ne vienas iš anksčiau išvardintų deskriptorių neturi visų šių savybių. Aukščiausio lygio deskriptoriai – generalizuoti cilindrai, geonai, vidurinės ašys, smūgio grafai ir skeletai – reikalauja griežto objekto ribų apibūdinimo. Tokiu atveju labai sudėtinga atvaizduoti sudėtingus grafinius modelius. Kiti formos atvaizdavimai (Išplėstinis *Gauso* atvaizdavimas, Sferinių atributų atvaizdavimas), momentai

(angl. *Moments*) ir banginės funkcijos (angl. *Wavelets*)) reikalauja atvaizduoti objektus koordinačių sistemoje – todėl toks sprendimas irgi nėra efektyvus. Galų gale, statistiniai formos deskriptoriai, tokie kaip ateities vektoriai ir formos paskirstymas nepateikia pakankamai atskirų objektų klasių skirtumų. Sistemoje naudojamas formos deskriptorius remiasi sferine funkcija (angl. *spherical harmonics*). Pagrindinė šio algoritmo funkcija yra išardyti trimatį objektą į funkcijų kolekciją. Toks rinkinys sudarytas iš funkcijų, kurios apibrėžia tam tikrą paviršių. Kiekvienam paviršiui taikomos sferinės funkcijos, kurios padeda apibrėžti paviršių padėti vienas kito atžvilgiu. Kadangi paieškos mechanizmas lygina ne objektus, o tik jų deskriptorius, tai paieška vyksta tokiu atveju greičiau ir pateikia daugiau tinkančių rezultatų. Sferinės funkcijos panaudojimas pranašus tuo, kad nereikia objektų atvaizduoti standartinėje koordinačių sistemoje. To dėka galima ieškoti ne tik sutampančių objektų, bet ir panašių objektų klasių.

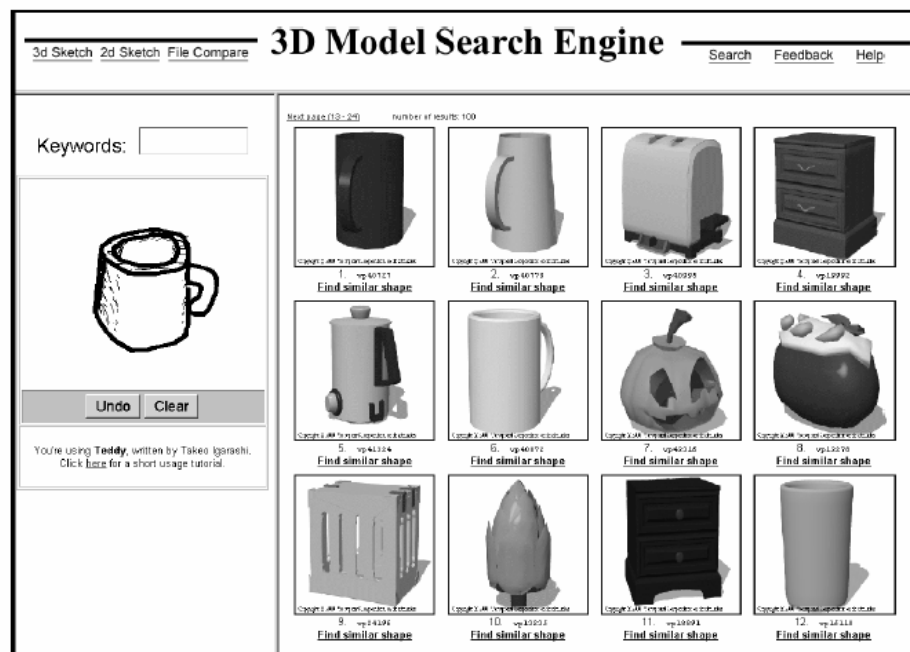


8 pav. Skirtingas tos pačios klasės objektų atvaizdavimas koordinačių sistemoje

3.3.3 Užklausų braižymas

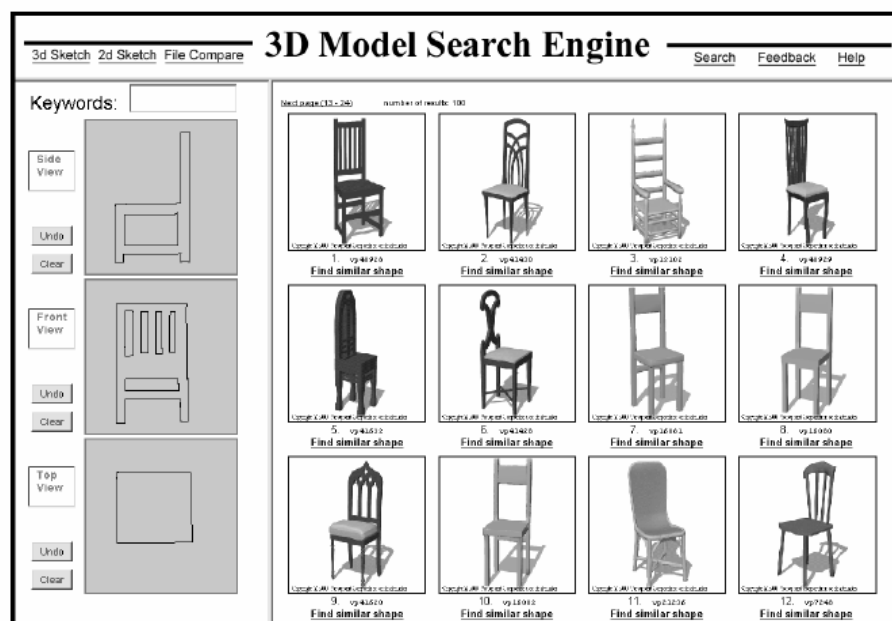
Formos panašumo užklausas galima kurti tik tokiu atveju, jeigu sukuriamas atitinkamas trimačių modelių atvaizdavimas. Kai kuriais atvejais paieškos sistema gali rasti rezultatų naudodama ir tekstines užklausas, tačiau visais kitais atvejais ji turi kurti pavyzdinę formą, pagal kurią bus realizuojama paieškos užklausa. Siekiama, kad užklausų braižymo sąsaja būtų paprasta ir vartotojas galėtų lengvai ja naudotis. Galima tai įvykdyti dviem būdais.

Pirmuoju panaudojamas paprastas trimačių modelių eskizų kūrimo įrankis, toks kaip Teddy [30]. Sistema nuskaityto vartotojo nubraižytą modelį ir pritaiko jam modelių susiejimo algoritmą (angl. *model matching algorithm*). Tačiau tokia sąsaja nėra paprasta ir jai naudotis reikia įgūdžių, todėl naudojami ir kiti alternatyvūs grafinių užklausų braižymo metodai.



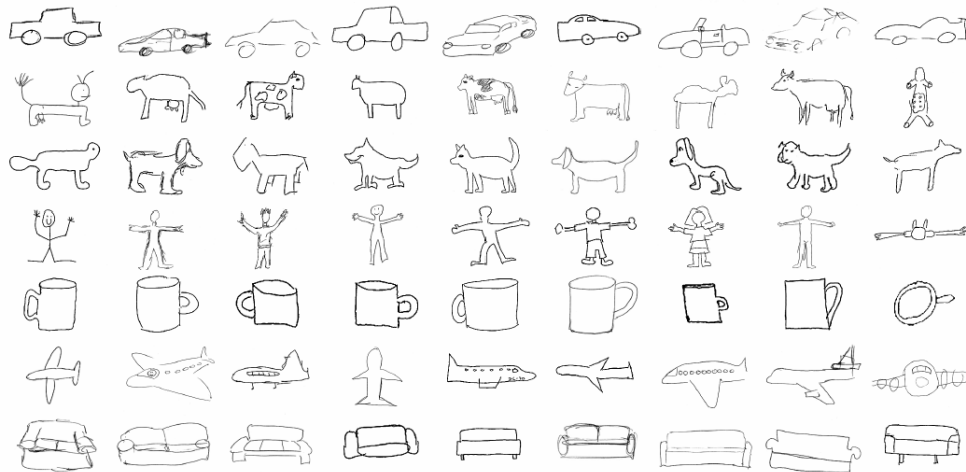
9 pav. Trimačių objektų užklauskos kūrimo grafinė vartotojo sąsaja

Antrasis būdas – nubraižyti dvimatis modelių formas piešimo programoje ir susieti tokius paveikslus su trimačių objektų dvimatėmis projekcijomis (angl. *2D projections of 3D objects*). Šio sprendimo pagrindinis privalumas yra tai, jog vartotojui nesunku išmokti naudotis užklauskų braižymo sąsaja. Tačiau šis būdas turi ir trūkumų – dvimačiai atvaizdavimai neturi tiek informacijos apie objekto formą, kiek turi jos trimačiai modeliai. Todėl kyla informacijos nepakankamumo grėsmė. Tam tikslui vartotojui leidžiama nubrėžti kelias ieškomo objekto projekcijas.



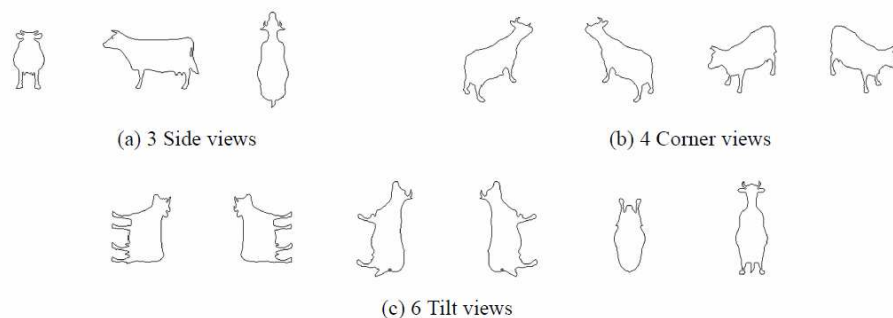
10 pav. Dvimačių užklauskų kūrimo grafinė vartotojo sąsaja

Pagrindinis šio sprendimo uždavinys yra sukurti algoritmą, kuris kokybiškai ir efektyviai susietų dvimačius formos atvaizdavimus su trimačiais objektais. Tam tikslui reikia išnagrinėti, kaip vartotojai braižo objektus dvimatėje plokštumoje, į ką daugiausiai kreipia dėmesio. Pasirodo, braižant grafinius objektus naudoja tik pagrindinių formų kontūrus ir dažniausiai iš priekinės objekto vaizdo projekcijos (angl. *front view*) [6].



11 pav. Galimi grafinėse užklausose panaudoti vartotojų atvaizdavimai

Vartotojo nubraižytos formos susiejamos su skirtingomis trimačio objekto projekcijomis ir parenkama ta, kuri yra labiausiai panaši užklausos formai. Tuo pačiu metu sukuriamas surastų rezultatų skirtingų trylikos projekcijų paveikslėlis: priekio, viršaus, kairės pusės, keturių kampų ir šeši skirtingų apvertimų vaizdai (angl. *titl views*) .

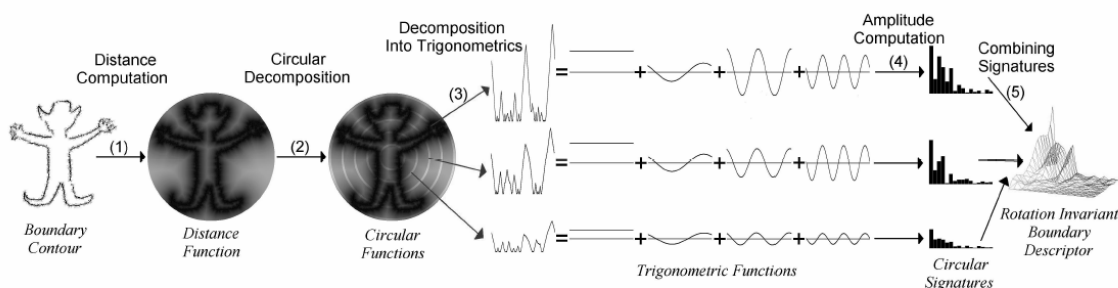


12 pav. Skirtingos objekto kontūro projekcijos.

Tada kiekvienai užklausai su m formų surandamas tam tikras skaičius 3D objektų rezultatų (iš kiekvienam $13m$ galimų). Vienas užklausos paveikslėlis gali atitikti tik vieną trimačio modelio projekcijos paveikslėlį – tokiu būdu užtikrinama, kad kiekvienas užklausos formos eskizas kinta 22.5° kampų. Be to, vartotojo nubrėžto pavyzdžio ašys gali sutapti su sugeneruotos projekcijos Dekarto ašimis – tokiu atveju jo panašumas tam tikram duomenų bazės objektui būna dar akivaizdesnis. Siekiant išvengti geometrinių objektų deformacijų, pirmiausiai suvienodinamas užklausos formos ir sugeneruoto trimačio

objekto paveikslėlio nuotolis nuo atskaitos sistemos pradžios. Tada pagal turimą kontūrą paskaičiuojamas formos deskriptorius (angl. *shape descriptor*). Jis kuriamas pagal šį algoritmą:

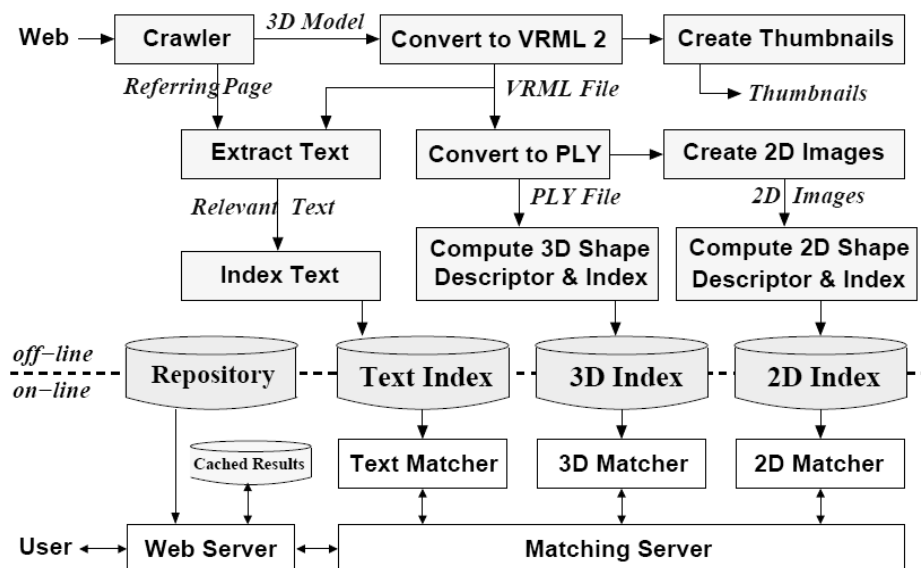
1. Apskaičiuojamas kontūro ribų transformacijos atstumas.
2. Siekiant apriboti skirtingų transformacijų laipsnius, sukuriama skritulinių funkcijų (angl. *circular functions*) kolekcija.
3. Kiekviena skritulinė funkcija išplečiama kaip trigonometrinių funkcijų suma.
4. Kadangi modelio pasukimai nepakeičia jo dažnių amplitudės, kiekviena skritulinė funkcija užrašoma kaip parinktų trigonometrinių funkcijų amplitudžių sąrašas.
5. Skritulinės funkcijos lyginamos su kontūro ribomis ir pagal jas sukuriamas užklauskos deskriptorius.
6. Kiekvienas deskriptorius indeksuojamas, panaudojant artimiausio kaimyno (angl. *nearest neighbor*) metodą.



13 pav. Formos deskriptoriaus skaičiavimas

3.3.4 Sistemos realizacija

Sistema realizuota C/C++, Java ir Perl programavimo kalbomis [30][14][16]. Pagrindiniai jos komponentai pavaizduoti diagramoje.



14 pav. Duomenų srautai paieškos sistemoje

Naudojama programinė ir techninė įranga: Red Hat Linux 7, Solaris web serveris, ir trimačių objektų konversijos įrankis Irix 6.5. Šiame skyriuje pateikiamas duomenų srauto modelis bei sistemos veiksmų seka.

Internete patalpinamų grafinių modelių peržiūrėjimas (angl. *crawler*) suprogramuotas Perl programavimo kalba. Šis mechanizmas naudoja 933 MHz Pentium III techninę įrangą, kiekvienas po 1GB atminties. Kiekvienas peržiūrėjimo procesas naudoja keliomis duomenų perdavimo gijomis (angl. *multithread*) ir parsiuočia grafinį modelį į serverį. Šis mechanizmas ieško AutoCAD, LightWave, PLY, 3D Studio, VRML ir Wavefront failų [30].

Kiekvienas parsųstas trimatis modelis konvertuojamas į VRML 2 formatą, vėliau į Ply formatą. Tada iš grafinio modelio išskiriamas jį aprašantis tekstas bei sugeneruojamas jo paveikslėlis, dvimačiai kontūro modeliai, apskaičiuojamas jo apibūdinimas sistemoje (angl. *signatures*). Toks paruoštas ir aprašytas modelis patalpinamas duomenų saugykloje bei yra indeksuojamas. Modelio deskriptorius skaičiuojamas, suskirstant jo poligonines erdves į 64x64x64 volumetrinių pikselių tinklą. Tokį tinklą sudaro 32 koncentrinės sferos (angl. *concentric spheres*). Su pirmųjų 16 harmonikų paskaičiuojamos sferos kitimo amplitudės. Šio veiksmo rezultatas yra 16x32 formos deskriptorius. Formos analizės procesas trunka 1.6 sekundės kiekvienam modeliui, sudarytam iš apie 3500 poligonų. Daugumą laiko užima poligonų atvaizdavimas volumetriniame tinkle. Jeigu norima paskaičiuoti formos deskriptorių dvimatiems modeliams, kiekvienam jų paveikslėliui priskiriamas 64x64 pikselių tinklas ir vykdomas toks pat analizės proceso mechanizmas. Tokiu atveju šis procesas užtrunka 0.4 sekundės kiekvienam paveikslėliui [30]. Kiekviena užklausa vykdoma TCP protokolu. Tekstinės užklauskos kuriamos pasitelkiant Bow tolkit klasifikatorių [30].

3.3.5 Grafinių objektų panašumo tyrimas – eksperimentų rezultatai.

Eksperimentas atliekamas buvo su „The Princeton Shape Benchmark - PSB“ programine įranga. PSB duomenų bazėje saugoma 1814 skirtingų tipų 3D grafinių modelių – baldų, lėktuvų, mechaninių detalių modelių ir kt. Objektai yra sugrupuoti į skirtingų keturių lygių klases: *base*, *coarse1*, *coarse2* ir *coarse3*. Pagrindinės paprastų formų klasės (angl. *base class*) elementai yra susiejami su aukštesnių klasių elementais.

Eksperimento metu buvo nagrinėjamas algoritmo efektyvumas, panaudojant skirtingas objektų klases bei dviejų (HSH(2)), trijų taškų (HSH(3)) arba kombinuotą (HSH(2)(3)+SHD) algoritmą. Rezultatai pateikiami lentelėje.

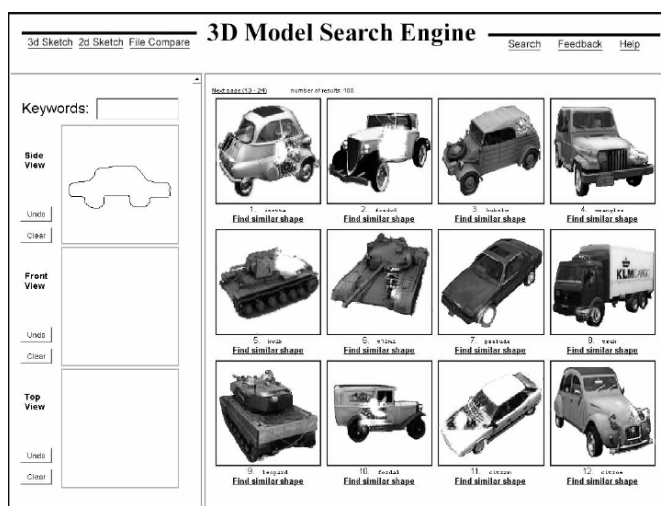
2 lentelė. Dviejų taškų (HSH(2)), trijų taškų (HSH(3)) ir kombinuoto (HSH(2)(3)+SHD) algoritmų efektyvumo palyginimas [4].

Features	Base	Coarse1	Coarse2	Coarse3
HSH_2	73,78%	61,43%	63,07%	88,42%
HSH_{23}	78,66%	51,4%	63,51%	86,99%
$HSH_{23}+SHD$	80,27%	50,33%	65,6%	87,85%

Lentelėje pateikiami rezultatai įrodo, kad pagrindinės paprastų formų klasės elementai geriausiai yra identifikuojami su kombinuotu algoritmu. *Coarse1* ir *Coarse3* klasių elementai geriausiai atpažįstami yra pasitelkus „dviejų taškų“ algoritmą. *Coarse2* klasės elementai geriausiai identifikuojami yra su kombinuotu algoritmu. Taigi, nagrinėjant šio eksperimento rezultatus galima teigti, jog „dviejų taškų“ algoritmo efektyvumas yra tinkamesnis grafinių objektų atrinkimo metodas. Kitą vertus, esant sudėtingesnėms formoms galima naudoti ir kombinuotą objektų atpažinimo algoritmą – tokiu atveju gaunami rezultatai yra tikslesni. Kuo aukštesnė objekto klasė, tuo jo suradimo ir atpažinimo efektyvumas yra didesnis – tai vyksta dėl to, kad aukštesnės klasės elementai yra detaliau aprašomi ir juos atrenkant reikia atsižvelgti ir jų klasifikaciją pagal žemesnes klases.

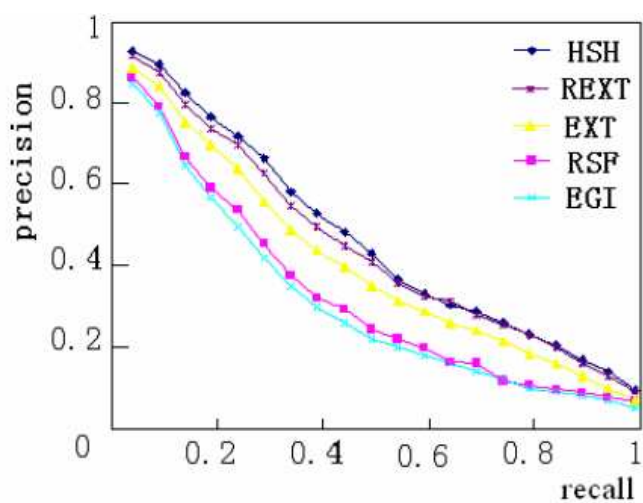
Eksperimento metu naudojami buvo šie koeficientai: masės centras – 0.5, Hadamard transformacijos ilgis – 32. Sferinės harmonikos transformacija skaičiuojama buvo 64x64 dydžio sferiniame tinkle. Eksperimentas buvo taikomas Princeton Shape Benchmark – PSB grafinių modelių duomenų bazės elementams.

Pradžioje pasirenkamas atsitiktinis duomenų bazės objektas – jis naudojamas kaip jos užklausa. Tada sistema gražina visus paieškos rezultatus, priklausomai nuo modelių panašumo lygio. Nagrinėjant gautus rezultatus galima teigti, jog pirmi keli duotai užklausiai atrinkti modeliai yra panašių formų kaip ir užklaustos objektas.



15 pav. Trimačių objektų paieškos mechanizmas. Užklaustos yra kuriamos iš tekstinių reikšminių žodžių bei formos paveikslų. Gražinami paieškos rezultatai yra 16 labiausiai atitinkančių (angl. *best matching*) grafinių objektų paveikslų. Rezultatus galima peržiūrėti paspaudus paveikslą [34]

Atskirų algoritmų veikimo efektyvumas palyginamas pagal atgaminimo atitikimą (angl. *precision* - *recall*). Grafike pateikiamas užklausos tikslumo procentais bei rezultatų tikslumo procentais santykis.



16 pav. Algoritmų efektyvumas pagal užklausos ir pateiktų rezultatų tikslumą.
(PSB duomenų bazės objektams) [34]

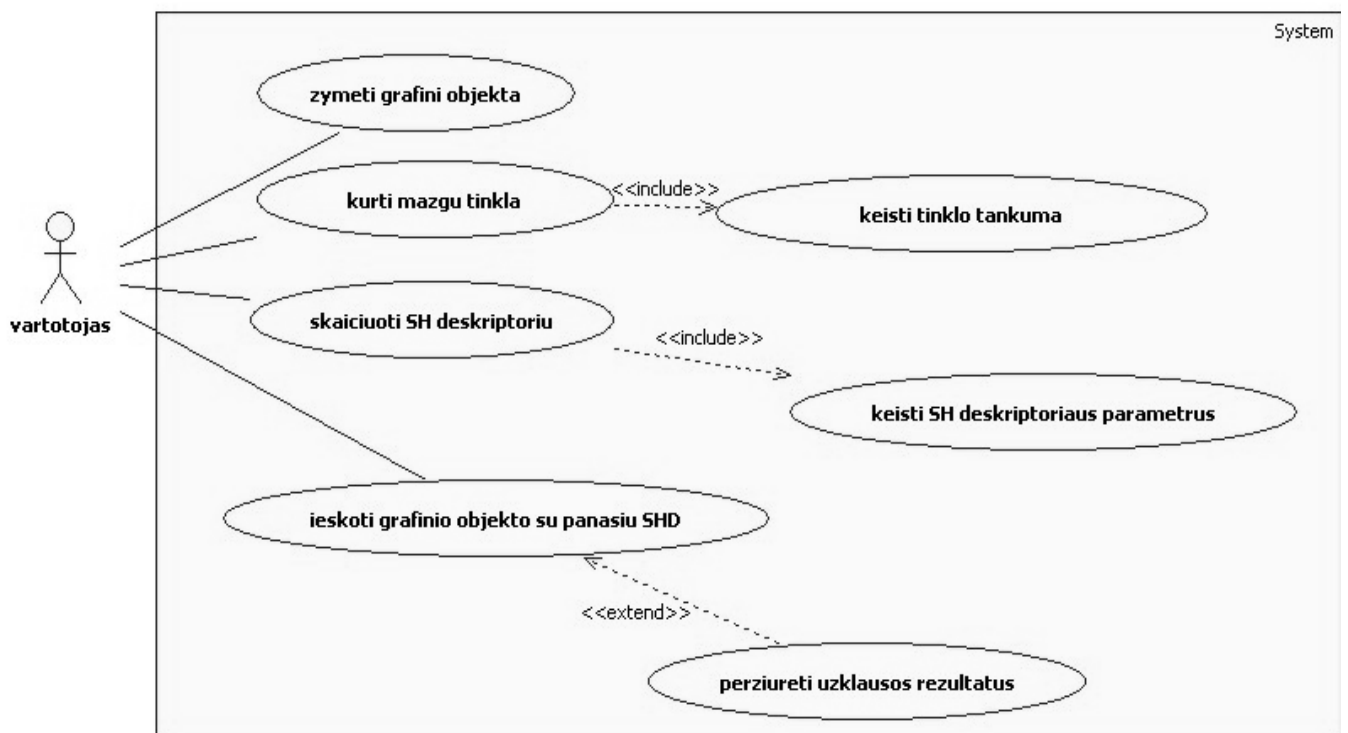
4. EKSPERIMENTAS IR JO REZULTATŲ ĮVERTINIMAS, LYGINAMOJI ANALIZĖ

4.1. Projektuojamos sistemos funkcijų aprašymas – panaudos atvejų diagrama

Sferinės harmonikos deskriptoriaus kūrimo algoritmas realizuojamas kaip AUTOCAD makrokomanda. Sistemos vartotojas yra žmogus, sugebantis naudotis pagrindinėmis AUTOCAD grafinio paketo funkcijomis. Kadangi programos grafinė sąsaja labai paprasta, neturi jis turėti jokių papildomų programinės įrangos naudojimo gebėjimų.

Su sukurta programa vartotojas gali vykdyti šias funkcijas: žymėti užklausos detalę, kurti grafinio objekto mazgų tinklą, keisti tinklo tikslumą, skaičiuoti sferinės harmonikos deskriptorių, keisti deskriptoriaus parametrus, ieškoti grafinio objekto su panašiu deskriptoriumi, peržiūrėti labiausiai užklausą atitinkančius grafinius objektus. Paieškos efektyvumas reikalauja vartotojo analizės ir pateikiamų rezultatų interpretacijos.

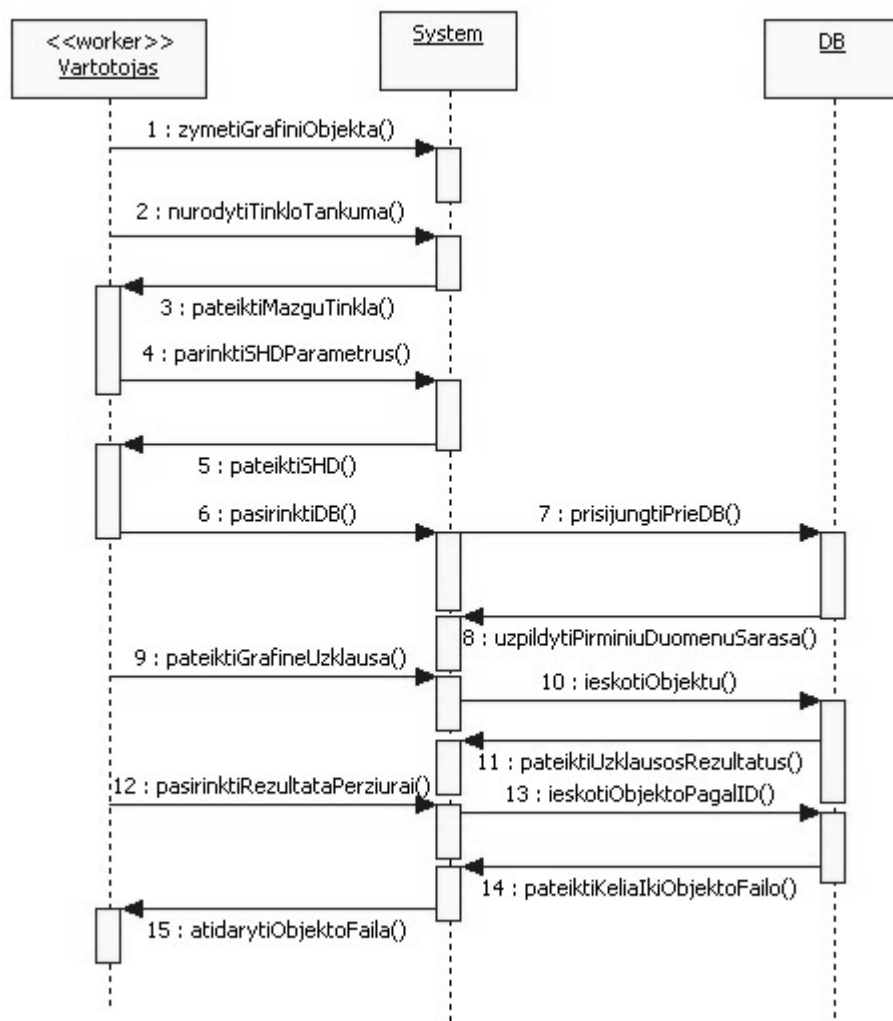
Sistema projektuojama UMK (angl. *UML*). Vartotojo galimi atlikti veiksmai pateikiami panaudos atvejų diagramoje.



17 pav. Sukurtos makrokomandos panaudos atvejų diagrama (angl. *use case diagram*)

4.2. Programos veiksmų – atoveiksmių modelis. Sekų diagrama.

Vartotojo ir sistemos sąveika vaizduojama sekų diagramoje (angl. *sequence diagram*).



18 pav. Sukurtos makrokomandos sekų diagrama

Vartotojo darbe su sistema galima išskirti tam tikrus etapus:

- 1 – vartotojas nurodo, kuris grafinis objektas bus nagrinėjamas, kokie parametrai bus naudojami jo formos deskriptoriaus kūrime (pirminių duomenų įvedimo etapas),
- 2 – sistema sukuria grafinio objekto mazgų tinklą bei apskaičiuoja sferinės harmonikos deskriptorių,
- 3 – sistema atrenka iš duomenų bazės tinkamiausius vartotojo užklausai rezultatus (darbas su duomenų baze, užklausų kūrimas, tinkamiausių rezultatų atrinkimas),
- 4 – vartotojas peržiūri gautus rezultatus (pateiktų rezultatų įvertinimas pagal tam tikrus kriterijus).

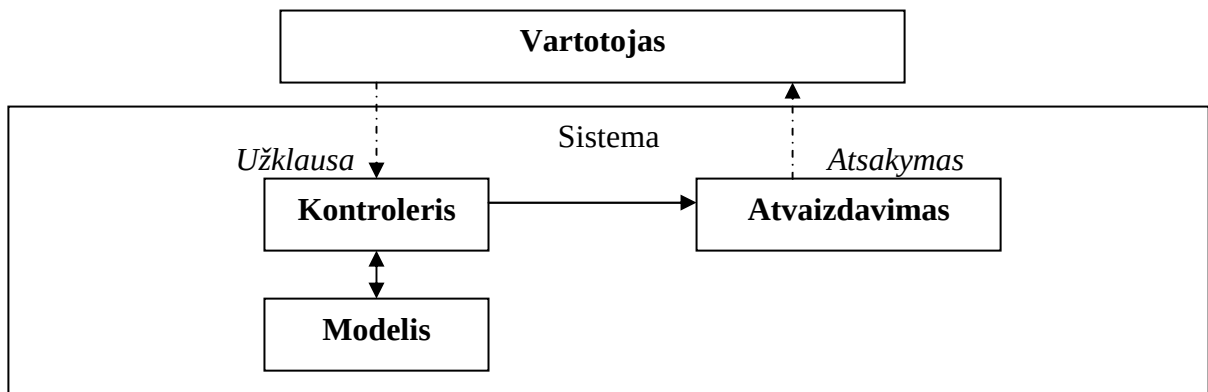
Vartotojo veiksmų ir sistemos atoveiksmių diagrama pateikiama lentelėje.

3 lentelė. Vartotojo veiksmų ir sistemos atoveiksmių seka.

Vartotojo veiksmas	Sistemos atoveiksmis
Pasirenka grafinį objektą.	Pažymi grafinį objektą darbo lauke.
Nurodo tinklo tankumą (neprivalomas veiksmas), paspaudžia tinklo brėžimo mygtuką.	Nubrėžia grafinio objekto mazgų tinklą, pažymi mazgus darbo lauke, suranda kiekvieno mazgo kaimyninius mazgus.
Nurodo sferinės harmonikos funkcijos parametrus.	Paskaičiuoja sferinės harmonikos funkcijos deskriptorių, užrašo jį kaip reikšmių seką.
Pasirenka duomenų bazę.	Prisijungia prie duomenų bazės. Nukopijuoja duomenų bazės įrašų ID ir deskriptorius į laikiną duomenų masyvą (kolekciją).
Pateikia užklausą.	Ieško tokių pačių ar panašių deskriptorių duomenų masyve. Pateikia geriausiai užklausą atitinkančių rezultatų sąrašą.
Pasirenka užklaustos rezultatą peržiūrai.	Atidaro grafinio objekto failą pagal duomenų bazėje pateiktą kelią iki objekto failo. (arba) Nukopijuoja objektą iš failo į darbo lauką.

4.3. Programos architektūra – klasių diagrama.

Programa pagrįsta MVC architektūra (angl. *Model – View – Control*). Išskiriami trys pagrindiniai moduliai: grafinė vartotojo sąsaja, duomenų apdorojimo modulis bei duomenų patikrinimo modulis.



Pav. 19. MVC architektūros modelis.

Naudojamos klasės:

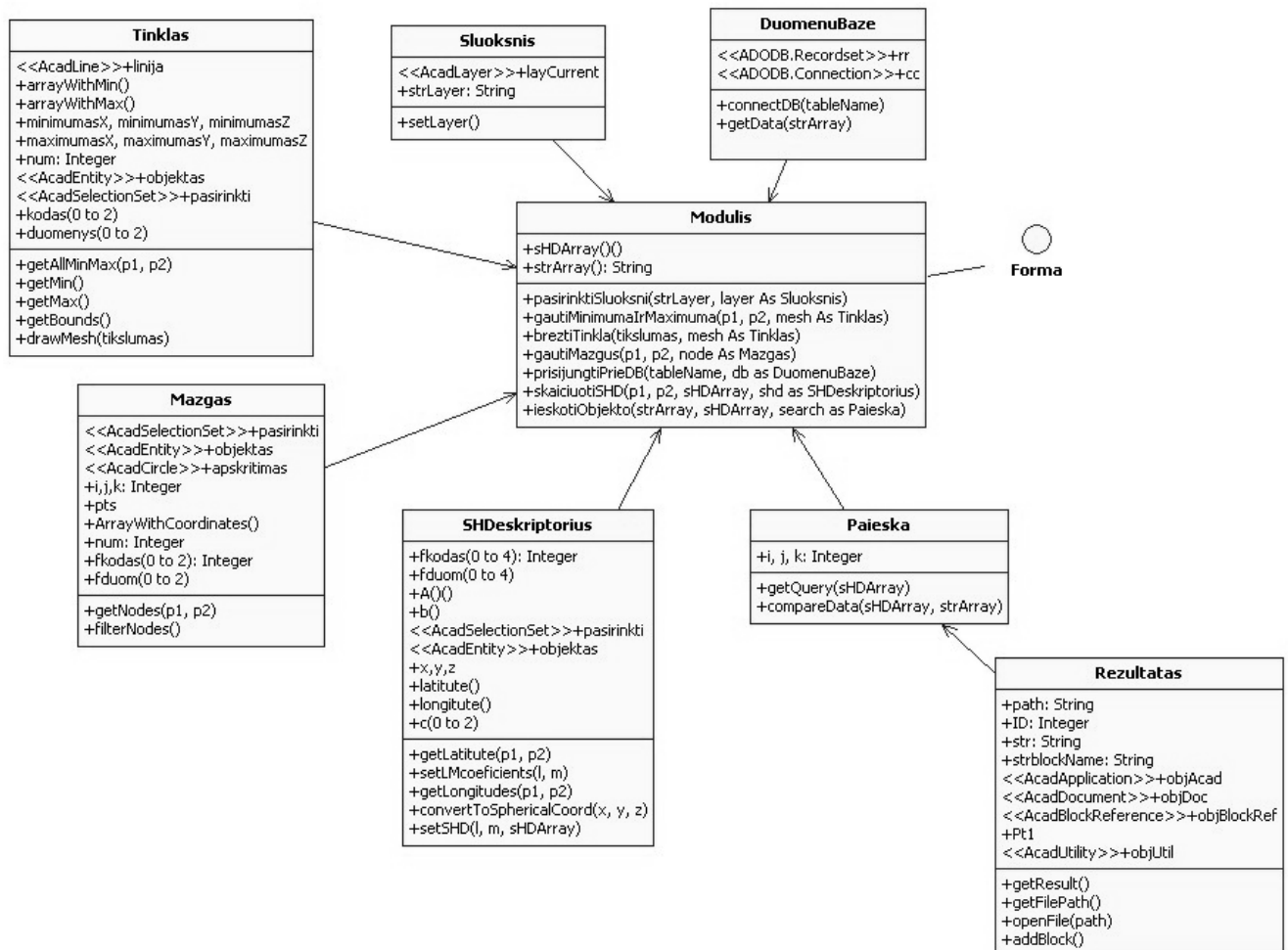
- *DuomenuBaze* – prisijungimo prie duomenų bazės klasė, vykdo duomenų nuskaitymą į laikiną duomenų masyvą;
- *Paieska* – duomenų paieškos klasė, naudoja „*K artimiausių kaimynų*“ algoritmą;
- *Sluoksnis* – nurodo kokiame sluoksnyje kuriami pagalbiniai grafinio objekto panašumo analizės elementai (pvz., mazgai, tinklas);
- *Tinklas* – kuria grafinio objekto viršūnių, reikšmingų mazgų bei briaunų tinklą; fiksuoja kiekvieno mazgo koordinatas bei jo kaimyninius mazgus;

- *SHDeskriptorius* - pagal nuskaitytą kontūrą bei parinktus parametrus generuoja sferinės harmonikos deskriptorių;
- *Rezultatas* – atidaro grafinio objekto failą (arba) nukopijuoja atrinkto grafinio objekto failo turinį į darbo lauką.



20 pav. Pasirinktos klasės realizacijos pavyzdys - „Tinklas“ metodai

Visos klasės apjungiamos *moduliu*, kuris vykdo duomenų korektiškumo patikrinimą (kontrolieriaus vaidmuo). Grafinė vartotojo sąsaja generuojama *formas* dalyje.

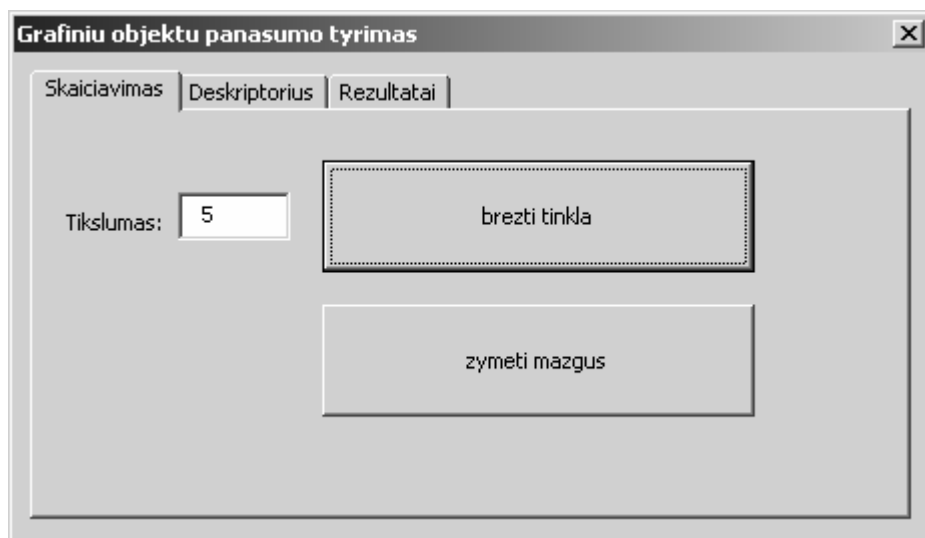


21 pav. Sistemos klasių diagrama

4.4. Programos realizacija

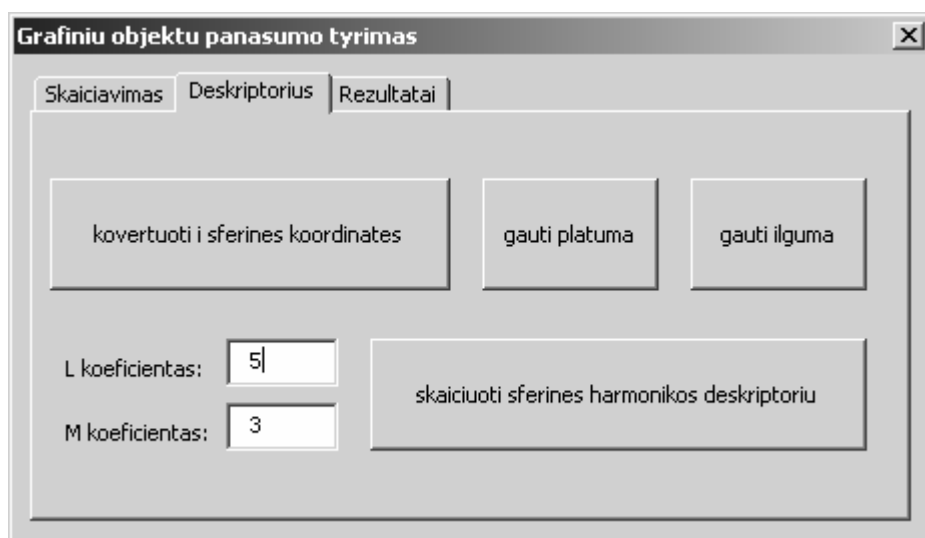
Sferinės harmonikos deskriptoriaus kūrimo algoritmas realizuojamas kaip AUTOCAD makrokomanda. Grafinė vartotojo sąsaja yra sudaryta iš trijų dalių:

1 – grafinio objekto viršūnių ir briaunų kūrimo kortelė; joje galima įvesti tinklo tankumo koeficientą (kuo didesnis, tuo tankesnis bus tinklas), galima taip pat brėžti tinklą bei žymėti jame grafinio objekto mazgus.



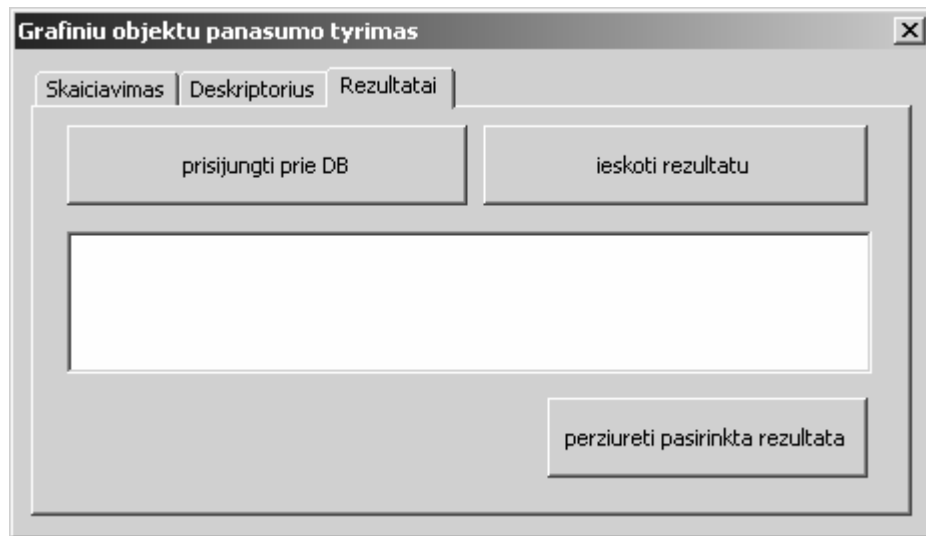
22 pav. Grafinio objekto mazgų tinklo sudarymo kortelė

2 – sferinės harmonikos deskriptoriaus skaičiavimo kortelė; ją sudaro šie mygtukai: Dekarto koordinačių sistemos taškų konvertavimo į sferines koordinates mygtukas, sferinės platumos ir ilgumos skaičiavimo mygtukai bei sferinės harmonikos funkcijos kolekcijos reikšmių skaičiavimo mygtukas; Sferinės harmonikos deskriptoriaus reikšmės priklauso nuo dviejų kintamųjų: l ir m – vartotojas gali keisti jų reikšmes.



23 pav. Sferinės harmonikos deskriptoriaus skaičiavimo kortelė

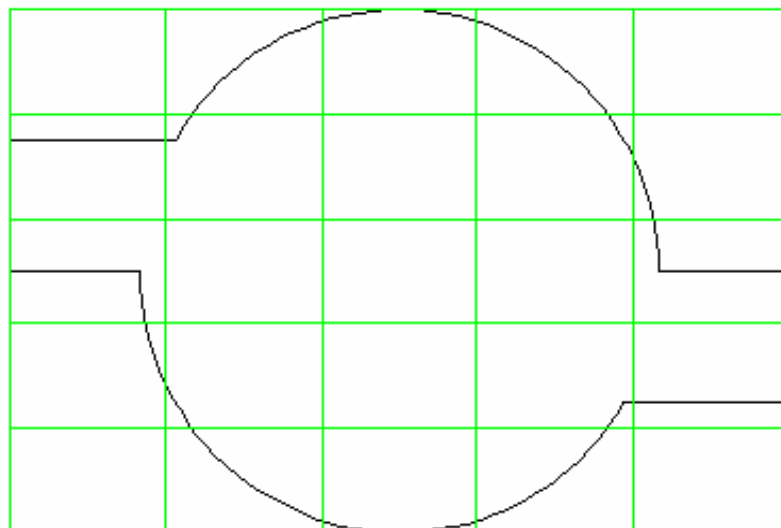
3 – paieškos ir rezultatų pateikimo kortelė; paieškos rezultatai pateikiami sąrašu; kiekvienas sąrašo elementas sudarytas yra iš: objekto ID, objekto aprašo, kelio iki pasirinkto failo; pasirinktas rezultatas įključuojamas į darbo lauką.



24 pav. Rezultatų pateikimo kortelė

4.4.1. Tinklo braižymas.

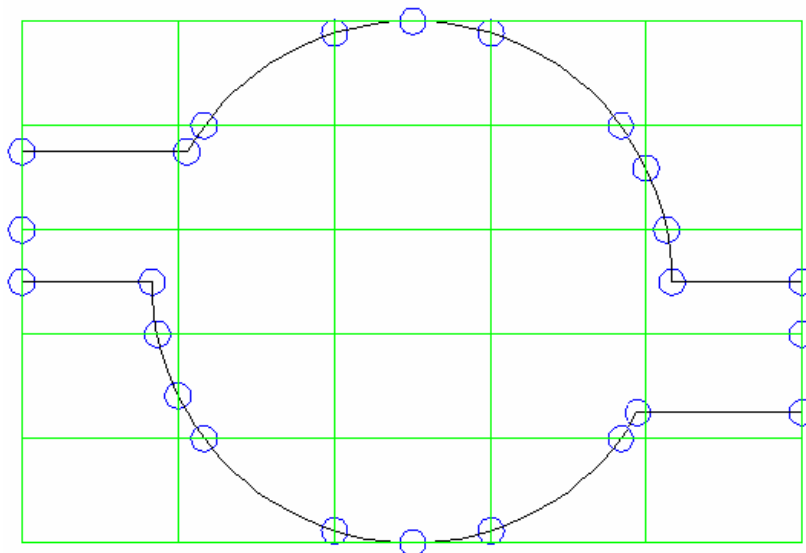
Grafinio objekto tinklas braižomas pagal vartotojo pasirinktą tikslumą. Tam tikslui panaudojant *AcadSelectionSet* kolekciją pažymimas darbo lauke esantis grafinis objektas. Kiekvienam kolekcijoje esančiam elementui priskiriamas jo pozicijos minimalus ir maksimalus taškas (*getBoundingBox* metodu). Tinklas braižomas cikle iš *AcadLine* objektų. Kiekvienam tinklo objektui priskiriami papildomi duomenys (*SetXData()* metodas).



25 pav. Tinklo braižymo pavyzdys

4.4.2. Mazgų žymėjimas.

Grafinio objekto mazgai yra tinklo ir grafinio objekto susikirtimo taškai (angl. *intersectWith()* metodas). Jie žymimi apskritimais, kurių papildomi duomenys yra kaimyninių mazgų skaičius bei jų ID numeriai.



26 pav. Grafinio objekto mazgai

4.4.3. Sąsaja su duomenų baze.

Programos naudojama duomenų bazė – Microsoft Office Access, duomenų lentelėje yra šie atributai: pirminis raktas ID (sveikųjų skaičių duomenų tipo – priskiriamas automatiškai), antrinis raktas SHID (sferinės harmonikos deskriptoriaus reikšmės), str – žodinis objekto aprašymas, PATH (tekstinė eilutė, kurioje nurodomas kelias iki pasirinkto modelio failo).

Duomenys nuskaitomi iš duomenų bazės pasitelkus ADO (*ActiveX data objects*) duomenų mainų su duomenų bazėmis technologiją. Ši technologija leidžia lengvai keisti informacija tarp AutoCAD aplinkoje veikiančios programos ir duomenų bazės. Tam tikslui naudojamas objektas *Connection* – jis sukuria ryšį su duomenų baze. Inicializuojamas taip pat ryšių objektas – į jį bus nuskaitomi duomenys iš duomenų bazės.

```
Set cc = New ADODB.Connection
With cc
.Provider = "Microsoft.Jet.OLEDB.4.0"
.Open "D:\db1.mdb"
End With
Set rr = New ADODB.Recordset
rr.Open "Lentele", cc, adOpenKeyset, adLockBatchOptimistic
```

Kai programos ryšys su duomenų baze yra jau sukurtas, belieka tik nuskaityti duomenų bazės duomenis į įrašų objektą. Įrašai nuskaitomi, kol nepasiekama lentelės paskutinė eilutė. Tuo pačiu vykdomas duomenų nuskaitymas į programos lango sąrašą.

```

ListBox1.Clear
Do Until rr.EOF
    ListBox1.AddItem rr(0) & "    " & rr(1) & "    " & rr(2) & "    " & rr(3)
    rr.MoveNext
Loop

```

4.4.4. Labiausiai užklausą atitinkančio grafinio objekto paieška.

Norint palyginti du sferinės funkcijos deskriptorius, reikia paskaičiuoti Euklido atstumą (angl. *Euclidean distance*) tarp jų. Jo matematinė išraiška:

$$d(x, y) = \|x - y\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} . \quad (12)$$

Tam tikslui paskaičiuojamas kiekvienos užklausos sferinės harmonikos deskriptoriaus reikšmės ir kiekvienos duomenų bazės sferinės harmonikos įrašo reikšmės skirtumas. Visi skirtumai įrašomi yra į pagalbinį dvimatį masyvą. Vėliau ieškomas jame masyvas su minimaliom reikšmėm.

Rezultatai išrenkami pasitelkus „K-artimiausio kaimyno“ algoritmą – atrenkami tie įrašai, kurių deskriptoriai turi daugiausiai mažiausių Euklido atstumų reikšmių.

4.4.5. Rezultatų pateikimas ekrane.

Rezultatai peržiūrimi įkėlus atitinkamo objekto bloką į darbo lauką. Tam tikslui pirmiausiai pasirenkamas tam tikras sąrašo įrašas. Nuskaitoma jo kelio iki grafinio objekto lauko reikšmė (*PATH* atributas). Bloko į darbo lauką įkėlimas vykdomas su *InsertBlock()* metodu.

```
Set insert = ThisDrawing.ModelSpace.InsertBlock(insertionP, name, x, y, z, rotation)
```

4.4.6. Programos darbo rezultatai.

Grafinių objektų panašumas bei jų paieškos efektyvumas lyginamas pagal du kriterijus: rezultatų suradimo laiką ir rezultatų atitikimą. Pirmasis kriterijus įvertinamas pagal užklausos vykdymo laiką – jis priklauso dalinai nuo naudojamos techninės įrangos parametrų. Antrasis – reikalauja vartotojo vaizdinio įvertinimo – yra subjektyvus, kadangi užklausos rezultatai dviejų vartotojų gali būti skirtingai vertinami.

Sferinės harmonikos deskriptoriaus efektyvumas analizuojamas su dvimačiais grafinais objektais. Kadangi siekiama, kad figūrų panašumas būtų vienareikšmiškas, dažnai užklausoms naudojami atsitiktinai parinkti duomenų bazės įrašai – tokiu atveju ieškoma identiškų objektų.

Naudojamos techninės įrangos parametrai: procesorius Inter Core Duo, taktinis dažnis 2.10 GHz,, 2.99 GB RAM. Naudojama duomenų bazė – Microsoft Office Access.

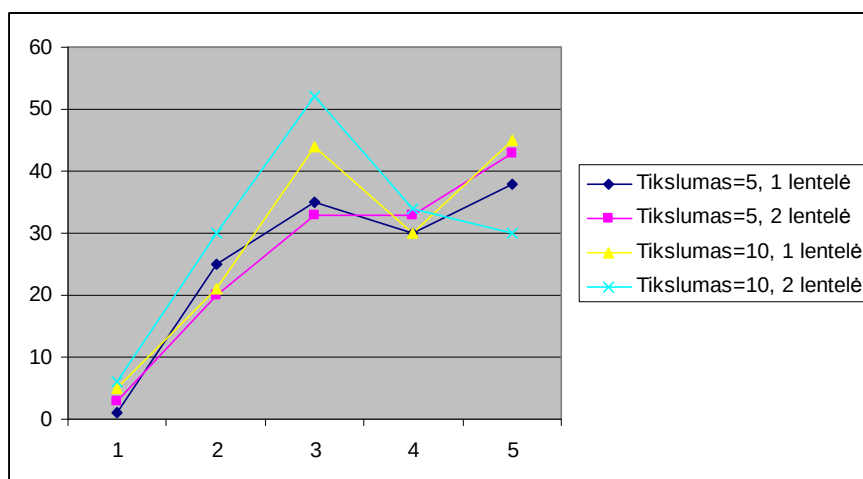
4.4.6.1. Paieškos efektyvumas pagal užklauso vykdyimo laiko kriterijų.

Paieškos efektyvumas įvertinamas pagal užklauso vykdyimo laiko kriterijų. Atliktas bandymų kiekis – 10. Gauti rezultatai pateikiami lentelėje. Kiekvienai užklauso pateikiama po 3 labiausiai atitinkančius grafinius objektus. Duomenų bazėje naudojamos dvi skirtingos duomenų lentelės – vienoje yra 10 įrašų, kitoje – 50.

4 lentelė. Užklauso vykdyimo laikas, priklausomai nuo objekto tipo, tinklo tikslumo bei sferinės harmonikos deskriptoriaus l ir m parametrų reikšmių.

Užklauso ID	l ir m parametrai	Tinklo tikslumas	Objekto aprašymas	Užklauso vykdyimo laikas 1-oje lentelėje	Užklauso vykdyimo laikas 2-oje lentelėje
1	l=5 m=2	5	A	25 sek.	35 sek.
2	l=3 m=3	10	B	30 sek.	38 sek.
3	l=3 m=3	5	F	20 sek.	33 sek.
4	l=5 m=2	10	M	33 sek.	43 sek.
5	l=3 m=3	5	T	21 sek.	44 sek.
6	l=5 m=2	10	A	30 sek.	45 sek.
7	l=3 m=3	5	Z	30 sek.	52 sek.
8	l=3 m=3	10	S	34 sek.	30 sek.
9	l=3 m=3	10	C	51 sek.	34 sek.
10	l=5 m=2	5	D	39 sek.	37 sek.

Pagal gautus rezultatus galima teigti, jog paieškos vykdyimo laikas priklauso nuo nagrinėjamos duomenų lentelės dydžio. Vidutinis užklauso vykdyimo laikas pirmoje lentelėje yra 3,13 sekundės, o antroje lentelėje – 3,91 sekundės. Kuo daugiau įrašų duomenų bazėje, tuo daugiau laiko užtrunka grafinių objektų paieška – reikia peržiūrėti daugiau objektų įrašų.

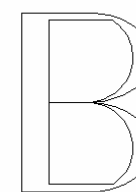
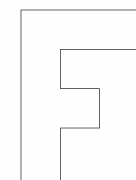
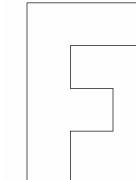
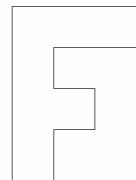
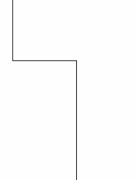
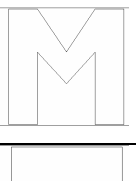
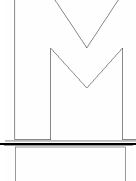
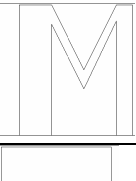
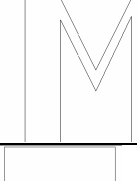
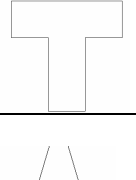
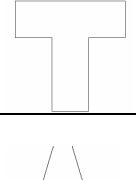
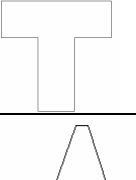
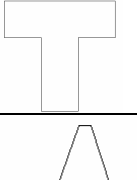
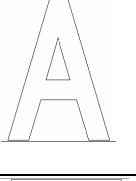
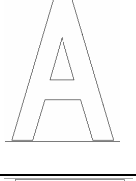
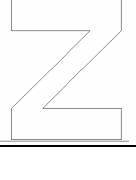
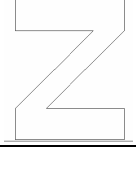
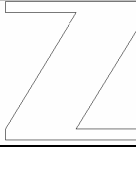
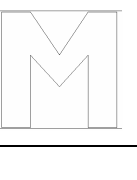


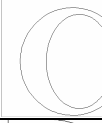
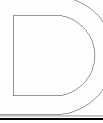
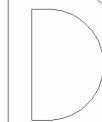
27 pav. Užklauso vykdyimo laiko diagrama

4.4.6.2. Grafinių objektų formos atitikimas.

Sferinės harmonikos deskriptoriaus kūrimo algoritmas įvertinamas yra pagal rezultatų atitikimą. Šis kriterijus subjektyvus, priklauso nuo vartotojo matomo vaizdo interpretacijos. Atliktas bandymų kiekis – 10, gauti rezultatai pateikiami lentelėje (bandymų sąlygos tos pačios). Kiekvienai užklausiai pateikiama po 3 labiausiai atitinkančius grafinius objektus.

5 lentelė. Grafinių objektų formos atitikimo bandymų rezultatai.

ID	Užklaustos objektas	Tinklo tikslumas	l ir m parametrai	1 rezultatas	2 rezultatas	3 rezultatas
1		5	l=5 m=2			
2		10	l=3 m=3			
3		5	l=3 m=3			
4		10	l=5 m=2			
5		5	l=3 m=3			
6		10	l=5 m=2			
7		5	l=3 m=3			

8		10	$l=3$ $m=3$			
9		10	$l=3$ $m=3$			
10		5	$l=5$ $m=2$			

Pagal gautus rezultatus galima teigti, jog sferinės harmonikos deskriptorius pakankamai gerai apibūdina grafinių objektų formas. Dauguma surastų rezultatų atitinka užklaustos grafinį objektą. Išskirtiniai atvejai – 2, 3, 7 ir 9 – šių bandymų rezultatai pateikia du panašios formos grafinius objektus bei trečiąjį nelabai panašų. Patikrinus duomenų bazės įrašus, pasirodo, kad duomenų bazės lentelėje neegzistuoja daugiau panašios formos grafinių objektų, todėl algoritmas parenka labiausiai panašų objektą (su mažiausiais Euklido atstumais). Tokių atvejų įmanoma išvengti dviem būdais: 1 – duomenų bazę papildoma bent 3 tokios pačios ar panašios formos grafiniais objektais, 2 – kuriamos ne tik grafinės užklaustos, bet ir tekstinės.

4.4.6.3. Sferinės harmonikos deskriptoriaus parametrų bei tinklo tankumo įtaka objektų panašumui ir jų paieškai.

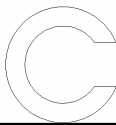
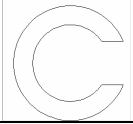
Grafinių objektų panašumas nusakomas pasitelkus sferinės harmonikos funkcijos deskriptorių – kuo mažesni Euklido atstumai tarp užklaustos deskriptoriaus ir rezultato deskriptoriaus, tuo grafiniai objektai panašesni. Tačiau norint taikyti grafiniams objektams sferinės harmonikos funkcijos deskriptorių, reikia tą objektą aprašyti. Kiekvienas grafinis objektas aprašomas jo viršūnėmis bei atitinkamais mazgais. Tam tikslui sudaromas grafinio objekto mazgų ir briaunų tinklas. Tinklo tankumo įtaka sferinės harmonikos deskriptoriui bei objektų panašumo tyrimui vaizduojama yra eksperimento rezultatų lentelėse ir rezultatų gavimo laiko diagramoje.

Bandymų metu naudojami du skirtingi tinklo tikslumai: 5 ir 10. Užklaustos vykdymo laikas, kai tikslumas lygus 5, yra trumpesnis, nei kai tikslumas – 10. Pagal gautus rezultatus galima pastebėti, kad kuo tankesnis yra grafinio objekto mazgų tinklas, tuo ilgiau vykdoma tų grafinių objektų paieška. Tinklo tankumas turi įtakos sferinės harmonikos deskriptoriaus reikšmių kiekiui – kuo tikslesnis objekto mazgų tinklas, tuo daugiau apskaičiuojama sferinės harmonikos deskriptoriaus reikšmių. Tokiu atveju, užklausų vykdymo laikas tampa ilgesnis – reikia palyginti didesnius objektų deskriptorių masyvus.

Kitas grafinių objektų formos panašumą įtakojantis kriterijus – sferinės harmonikos l ir m parametrai. Šių kintamųjų reikšmės nusako sferos orbitalinių linijų ir mazgų išsidėstymą. Jeigu funkcijos $m=0$, tai orbitalinės linijos išsidėsto horizontalia platumos kryptimi. Jeigu $l=|m|$, orbitalinės linijos išsidėsto vertikalia ilgumos kryptimi.

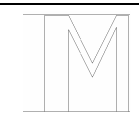
Bandymų metu naudojami dvi skirtingos l ir m parametų kombinacijos (žr. 4, 5 ir 27). Geriausiai parametų įtaką objektų formos panašumo atpažinimui parodo dviejų skirtingų sferinės harmonikos deskriptorių reikšmių Euklido atstumai. Kuo mažesni atstumai, tuo grafiniai objektai panašesni.

6 lentelė. Euklido atstumai su $m=3$ ir $l=3$ parametų reikšmėmis bei tinklo tikslumu=10

objektas		l ir m parametrai	tikslumas	laikas	Bandymas 9, 1 rezultatas	Bandymas 9, 2 rezultatas	Bandymas 9, 3 rezultatas
							
Bandymas 9, 1 rezultatas		$l=3, m=3$	10	34 s	0	0,0241	0,0673
Bandymas 9, 2 rezultatas		$l=3, m=3$	10	34 s	0,0241	0	0,0724
Bandymas 9, 3 rezultatas		$l=3, m=3$	10	34 s	0,0673	0,0724	0

Kai $l=3$ ir $m=3$, nagrinėjamų objektų tinklo orbitalinės linijos išsidėsto vertikalia ilgumos kryptimi. Tokiu atveju sferinės harmonikos deskriptorius nagrinėja tik tuos mazgus, kurie yra išsidėstę jų kryptimi – neatsižvelgia į grafinio objekto viršūnes ir briaunas, kurios yra išsidėsčiusios objekto horizontalia platumos kryptimi. Pastebėtina, kad šiais atvejais atrinkti buvo ir nevysiškai grafinę užklausa atitinkantys objektai.

7 lentelė. Euklido atstumai su $m=5$ ir $l=2$ parametų reikšmėmis bei tinklo tikslumu=10

objektas		l ir m parametrai	tikslumas	laikas	Bandymas 4, 1 rezultatas	Bandymas 4, 2 rezultatas	Bandymas 4, 3 rezultatas
							
Bandymas 4, 1 rezultatas		$l=5, m=2$	10	43 s	0	0,0023	0,0023

Bandymas 4, 2 rezultatas		$l=5, m=2$	10	43 s	0,0023	0	0
Bandymas 4, 3 rezultatas		$l=5, m=2$	10	43 s	0,0023	0	0

Kai $l=5$ ir $m=2$, tinklo orbitalinės linijos išsidėsto tolygiai ir vertikalios ilgumos, ir horizontalios platumos kryptimi. Tokiu būdu grafinio objekto tinklas yra tankesnis – sferinės harmonikos deskriptorius tampa tikslesnis ir turi daugiau objekto formą apibūdinančių reikšmių.

5. MAGISTRANTO PUBLIKUOTAS STRAIPSNIS

SFERINĖS HARMONIKOS FUNKCIJOS PANAUDOJIMAS, KURIANT DVIMAČIŲ GRAFINIŲ MODELIŲ DESKRIPTORIŲ

Irena Markievicz

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: irena.markievicz@gmail.com

Santrauka. Nagrinėjamos sferinės harmonikos deskriptoriaus sukūrimo galimybės, panaudojant jį dvimačių grafinių objektų formų atpažinime. Tam tikslui išnagrinėjamos galimos grafinių objektų formos atpažinimo technologijos ir algoritmai. Išsiaiškinama, kaip kuriamas matematinis sferinės harmonikos modelis bei kaip galima jį vizualizuoti grafinėje sistemoje. Išnagrinėjamas sferinės harmonikos funkcijos deskriptoriaus kūrimo bei paieškos vykdymo algoritmas. Apžvelgti eksperimentiniai ir teoriniai darbai, išnagrinėtos realizuotos grafinių objektų paieškos sistemos bei objektų formos atpažinimo efektyvumas. Realizuota sferinės harmonikos deskriptorių grafiniam objektui sukurianti programa, kuri leidžia taip pat lyginti deskriptorius vieną su kitu bei atrinkti tris labiausiai užklausa atitinkančius grafinius objektus. Atlikus 10 bandymų, pagal gautus rezultatus galima teigti, jog paieškos vykdymo laikas priklauso nuo dviejų veiksnių: objekto tipo bei nagrinėjamos duomenų lentelės dydžio. Palyginus su paprasto tipo grafiniais objektais, sudėtingų grafinių objektų deskriptoriaus kūrimo laikas prailgėja apytiksliai dvigubai. Deskriptoriaus algoritmas turi trūkumų – objektai nepilnai atitinka paieškos užklausa. Deskriptorius neatsižvelgia į skylės objekte, ne visada pirmas atrenkamas geriausiai paieškos užklausa atitinkantis rezultatas.

Reikšminiai žodžiai: grafinio objekto formos deskriptorius, sferinės harmonikos funkcija, grafinių objektų formos panašumo tyrimas, grafinių objektų paieška.

Įvadas

Kuriant grafinių objektų panašumą nagrinėjančias sistemas, svarbu sukurti tokį deskriptorių, kuris būtų unikalus ir vienareikšmiai apibūdintų grafinį objektą. Atliekant objektų formos paiešką, svarbu, kad objektas būtų atvaizduojamas skaitmeniniu būdu, dažniausiai atvaizduojant jo karkasą, apimtį arba taškus. Toks modelis dažnai supaprastinamas ir sukuriamas jo formos deskriptorius (angl. *shape descriptor*). Su kiekvienu deskriptoriumi galima atkurti originalią objekto formą. Pagrindinis uždavinys yra sukurti tokį 3D objekto formos atvaizdavimą (angl. *shape description*), kuris galėtų būti panaudojamas paprastose paieškos užklausose ir greitai pateikti rezultatus. Tam tikslui panaudojamos sferinės harmonikos funkcijos (angl. *spherical harmonics*) (Funkhouser T., Kazhdan M., Min P., Shilane P. *et al.* 2006). Nagrinėjami taip pat yra 3D ir 2D objektų formų panašumai (angl. *shape similarity*).

Kuriant tam tikrą formos deskriptorių, naudinga vadovautis šiais kriterijais (Marr, Nishihara *et al.* 1998): pasiekiamumas (angl. *accessibility* – nusako deskriptoriaus skaičiavimo sudėtingumo lygį), unikalumo laipsnis (angl. *scope of uniqueness* – nusako, kokia grupė grafinių objektų gali būti apibūdinama šiuo deskriptoriumi), stabilumas ir jautrumas (angl. *stability and sensitivity* – nusako, kaip deskriptorius reaguoja į nedidelius nagrinėjamo objekto formos pakeitimus).

Pagrindinis formų atpažinimo algoritmų efektyvumo kriterijus yra vizualus algoritmo vartotojo įvertinimas. Be

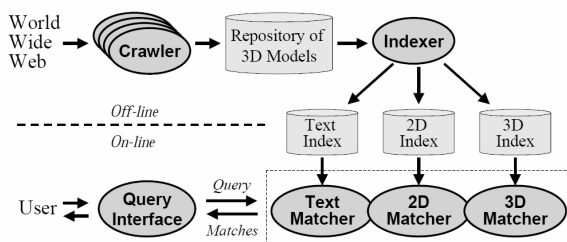
vartotojo vizualaus įvertinimo, nagrinėjant grafinių objektų formų panašumą naudojami ir kompiuterinės grafikos metodai. Jie įvertina objektų kontūrą (angl. *shape from contour*), geometriją (angl. *shape from geometry*), apšvietimą (angl. *shape from shading*) ir tekstūrą (angl. *shape from texture*).

Norint atlikti objektų panašumo tyrimą bei jų paiešką, reikia turėti pakankamai didelę dvimačių ir trimačių grafinių objektų saugyklą. Tos saugyklos objektai – grafiniai modeliai, kurių kiekvienas apibūdinamas tam tikru sferinės harmonikos funkcijos deskriptoriumi. Kita būtina sąlyga: atitinkamas deskriptorių kūrimo mechanizmas, kuris suindeksuoja visus duomenų bazės grafinius objektus. Jeigu mechanizmas sukurtas taisyklinga, jis sukuria formos deskriptorių, kuris yra unikalus ir pakankamai tiksliai apibūdina dvimačio arba trimačio grafinio objekto formą.

Jeigu antrąją sąlygą tenkina keliolika sistemų (pvz., *Spherical harmonics generator in OpenGL*, *SHAPE: Spherical Harmonic Parametrization Explorer*, *Shansyn: Spherical Harmonic package* ir kt.), tai surasti didelę ir gerai suindeksuotą grafinių objektų duomenų bazę yra gana sudėtingas uždavinys. Viena tokia duomenų saugykla – *The Princeton Shape Benchmark* sistema.

Sistemos veikimas pagrįstas keturiais etapais (Funkhouser T., Kazhdan M., Shilane P., Min P., Kiefer W., Tal A., Rusinkiewicz S., Dobkin D. *et al.* 2004): peržiūrėjimas (angl. *crawling*), indeksavimas (angl. *indexing*), užklausa kūrimas (angl. *querying*), rezultatų susiejimas (angl. *matching*). Pirmi du žingsniai vykdomi tam, kad sukaupti

didžiulę grafinių objektų duomenų saugyklą, kiti realizuojami kiekvieną kartą vartotojui vykdant paiešką.



1 pav. The Princeton Shape Benchmark sistemos modelis ir jos veikimo schema. Sistemą sudaro: trimačių objektų duomenų saugykla (angl. *Repository of 3D Models*), vartotojo užklauso grafinė sąsaja (angl. *Query Interface*) bei indeksavimo mechanizmas (angl. *Indexer*), kuris sukuria trijų rūšių identifikatorius: tekstinių užklauso, dvimačių objektų, trimačių objektų (Funkhouser T., Kazhdan M., Min P., Shilane P. et al. 2006).

Fig. 1. The Princeton Shape Benchmark system model. System contains repository of 3D models, user query interface and indexer, which creates the 3 types of ID: text index, 2D index and 3D index (Funkhouser T., Kazhdan M., Min P., Shilane P. et al. 2006).

Vartotojo nubraižytos formos susiejamos su skirtingomis trimačio objekto projekcijomis ir parenkama ta, kuri yra labiausiai panaši užklauso formai. Tuo pačiu metu sukuriamas surastų rezultatų skirtingų trylikos projekcijų paveikslėlis: priekio, viršaus, kairės pusės, keturių kampų ir šeši skirtingų apvertimų vaizdai (angl. *titl views*).

Tada kiekvienai užklauso su m formų surandamas tam tikras skaičius 3D objektų rezultatų (iš kiekvienam $13m$ galimų). Vienas užklauso paveikslėlis gali atitikti tik vieną trimačio modelio projekcijos paveikslėlį – tokiu būdu užtikrinama, kad kiekvienas užklauso formos eskizas kinta 22.5° kampu.

Formos deskriptorius (angl. *shape descriptor*) paskaičiuojamas pagal šį algoritmą (Funkhouser T., Kazhdan M., Min P., Shilane P. et al. 2006):

1. Apskaičiuojamas kontūro ribų transformacijos atstumas.
2. Siekiant apriboti skirtingų transformacijų laipsnius, sukuriami skritulinių funkcijų (angl. *circular functions*) kolekcija.
3. Kiekviena skritulinė funkcija išplečiama kaip trigonometrinių funkcijų suma.
4. Kadangi modelio pasukimai nepakeičia jo dažnių amplitudės, kiekviena skritulinė funkcija užrašoma kaip parinktų trigonometrinių funkcijų amplitudžių sąrašas.
5. Skritulinės funkcijos lyginamos su kontūro ribomis ir pagal jas sukuriamas užklauso deskriptorius.
6. Kiekvienas deskriptorius indeksuojamas, panaudojant artimiausio kaimyno (angl. *nearest neighbor*) metodą.

PSB duomenų bazėje saugoma 1814 skirtingų tipų 3D grafinių modelių – baldų, lėktuvų, mechaninių detalių modelių ir kt. Objektai yra sugrupuoti į skirtingų keturių lygių klases: *base*, *coarse1*, *coarse2* ir *coarse3*. Pagrindinės paprastų

formų klasės (angl. *base class*) elementai yra susiejami su aukštesnių klasių elementais.

Eksperimento metu buvo nagrinėjamas algoritmo efektyvumas, panaudojant skirtingas objektų klases bei dviejų (HSH(2)), trijų taškų (HSH(3)) arba kombinuotą (HSH(2)(3)+SHD) algoritmą. Rezultatai pateikiami lentelėje.

Features	Base	Coarse1	Coarse2	Coarse3
HSH_2	73.78%	61.43%	63.07%	88.42%
HSH_{23}	78.66%	51.4%	63.51%	86.99%
$HSH_{23}+SHD$	80.27%	50.33%	65.6%	87.85%

8 lentelė. Dviejų taškų (HSH(2)), trijų taškų (HSH(3)) ir kombinuoto (HSH(2)(3)+SHD) algoritmų efektyvumo palyginimas (Fehr, J.; Burkhard, H. et al. 2007).

Table 1. Comparison two points (HSH(2)), three points (HSH(3)) and combination (HSH(2)(3)+SHD) algorithms for their efficiency research (Fehr, J.; Burkhard, H. et al. 2007).

Lentelėje pateikiami rezultatai įrodo, kad pagrindinės paprastų formų klasės elementai geriausiai yra identifikuojami su kombinuotu algoritmu. *Coarse1* ir *Coarse3* klasių elementai geriausiai atpažįstami pasitelkus „dviejų taškų“ algoritmą. *Coarse2* klasės elementai geriausiai identifikuojami yra su kombinuotu algoritmu. Taigi, nagrinėjant šio eksperimento rezultatus galima teigti, jog „dviejų taškų“ algoritmo efektyvumas yra tinkamesnis grafinių objektų atrinkimo metodas. Kitą vertus, esant sudėtingesnėms formoms galima naudoti ir kombinuotą objektų atpažinimo algoritmą – tokiu atveju gaunami rezultatai yra tikslesni. Kuo aukštesnė objekto klasė, tuo jo suradimo ir atpažinimo efektyvumas yra didesnis – tai vyksta dėl to, kad aukštesnės klasės elementai yra daugiau aprašomi ir juos atrenkant reikia atsižvelgti ir jų klasifikaciją pagal žemesnes klases.

Šio darbo tikslas – išsiaiškinti, kaip kuriamas sferinės harmonikos funkcijos deskriptorius, apibūdinantis dvimačius grafinius objektus.

Tam tikslui realizuojami yra šie darbo uždaviniai:

- išnagrinėti galimus objektų formos atpažinimo technologijas ir algoritmus;
- išsiaiškinti, kaip sukuriamas matematinis sferinės harmonikos modelis bei kaip galima jį vizualizuoti grafinėje sistemoje;
- išnagrinėti sferinės harmonikos funkcijos deskriptoriaus kūrimo bei paieškos vykdymo algoritmą.

Sferinės harmonikos funkcijos matematinis modelis

Sferinės harmonikos funkcijos – tokios funkcijos, kurios yra Laplace'o diferencialinės lygties sprendiniu (Loncaric S. et al. 1998). Jos užrašomos sferine simetrija:

$$\left[\frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} + \lambda \right] Y(\theta, \phi) = 0 \quad (1)$$

kur λ – separacijos konstanta, o $\{\theta, \phi\}$ – sferinės koordinatų sistemos konstantos.

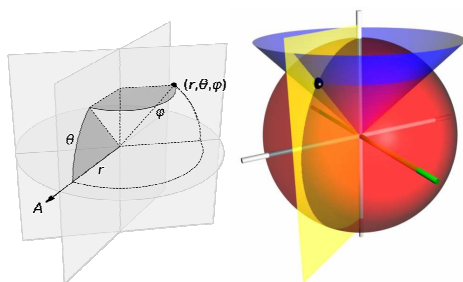
Skaičiavimų dėka galima sferinės harmonikos funkcijas užrašyti tokiu pavidalu (Loncaric S. *et al.* 1998):

$$Y_{lm}(\theta, \phi) = (-1)^m \left[\frac{(2l+1)(l-m)!}{4\pi(l+m)!} \right]^{1/2} P_l^m(\cos \theta) e^{im\phi}, \quad (2)$$

kur l – sveikasis skaičius, m – sveikasis skaičius, mažesnis kaip m , P_l^m – Legendre'o funkcijos.

Sferinių harmonikų grafinė interpretacija

Sferinės harmonikos funkcijos yra θ ir ϕ kintamųjų funkcijomis sferinėje atskaitos sistemoje. Sferinė koordinatų sistema, tai tokia sistema, kurioje pasirinkto taško padėtis nusakoma trimis koordinatėmis: r – radialiniu taško atstumu nuo koordinatų sistemos centro, θ – pakėlimo kampas nuo koordinatų sistemos horizontalios atskaitos plokštumos iki taško, ϕ – azimuto kampas nuo koordinatų sistemos vertikalios atskaitos plokštumos iki taško.



2 pav. Sferinės koordinatų sistemos schema ir trimatis modelis. Raudona sfera žymi taško nuotolį nuo koordinatų sistemos centro (r), geltona plokštuma padeda nusakyti kampą (θ) tarp horizontalios koordinatų sistemos atskaitos plokštumos ir taško, violetinis išplovos paviršius padeda nustatyti kampą (ϕ) tarp vertikalios koordinatų sistemos atskaitos plokštumos ir taško.

Fig. 2. Illustration of spherical coordinates. The red sphere shows the points with r , the blue cone shows the points with inclination θ , and the yellow half-plane shows the points with azimuth ϕ .

Sferinės koordinatų sistemos taškus galima vaizduoti ir paprastoje Dekarto koordinatų sistemoje. Norint atvaizduoti jas Dekarto atskaitos sistemoje, reikia harmonikų paviršius apsukti aplink r spindulio sferą.

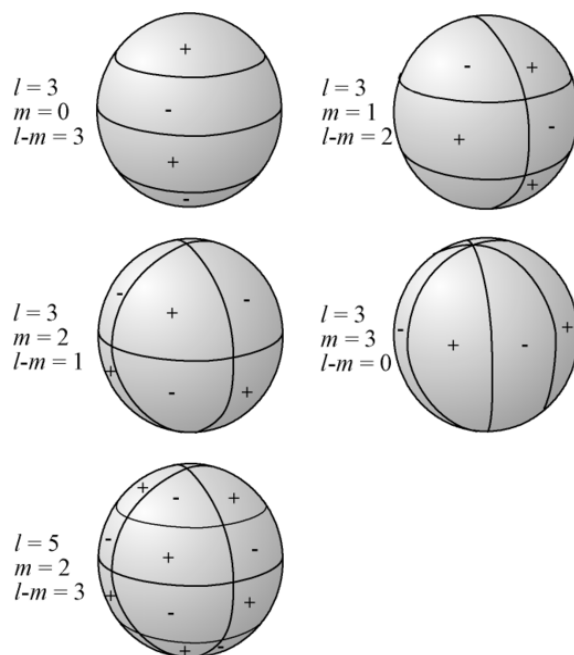
$$x = r \cos \theta \sin \phi, y = r \sin \theta \sin \phi, z = r \cos \theta$$

Sferinės harmonikos funkcijos gali būti vizualizuojamos, panaudojant jų orbitalinius mazgus (angl. *orbital node, nodal lines*) (Funkhouser T., Min P., Kazhdan M., Chen J., Halderman A., Dobkin D., Jacobs D., *et al.* 2006). Orbitaliniai mazgai – tai erdvės taškų rinkinys, kuriame sferinės harmonikos funkcija jau neturi savo reikšmių (jau nebeegzistuoja). Tokiu atveju orbitalinius

mazgus galima suvokti kaip duoto objekto sferinės harmonikos funkcijų ribą.

Mazgų orbitos sukuriamos apskritimo pagrindu: vieni jos mazgai yra suvokiami kaip platumos (angl. *latitudes*) taškai, kiti – kaip ilgumos (angl. *longitudes*) (Pu J., Ramani K. *et al.* 2006). Kiekvienas mazgas gali turtėti tam tikrą apskritimo formos orbitų skaičių, kuris apskaičiuojamas, kuriant nepriklausomas linijas nuo nulinės platumos reikšmės platumos ir ilgumos kryptimis. Platumos kryptimi Legendre funkcijos prilyginamos yra $l-|m|$ nulinėms reikšmėms, o ilgumos kryptimi trigonometrinės $\sin$ ir $\cos$ funkcijos prilyginamos yra $2|m|$ nulinėms reikšmėms.

Kai sferinės harmonikos funkcijos m reikšmės lygiuos 0, sferinės harmonikos funkcija nepriklauso nuo atskaitos sistemos ilgumos reikšmių – yra atvaizduojamos zonomis (angl. *zonal spherical harmonics*). Kai $l=|m|$, sferinės harmonikos funkcija nepriklauso nuo platumos reikšmių – yra atvaizduojamos sektoriais (angl. *sectoral spherical harmonics*). Visais kitais atvejais funkcijos atvaizduojamos sferos dalimis (angl. *tesseral spherical harmonics*) (Funkhouser T., Kazhdan M., Min P., Shilane P. *et al.* 2006).



3 pav. Sferinės harmonikos funkcijų grafinis atvaizdavimas sferos orbitalinėmis linijomis ir mazgais. Jeigu funkcijos $m=0$, orbitalinės linijos išsidėsto horizontalia platumos kryptimi, jeigu $l=|m|$ – orbitalinės linijos išsidėsto vertikalioje ilgumos kryptimi.

Fig. 3. Illustration of spherical harmonics. If $m=0$, orbital go horizontal, if $l=|m|$ – vertical.

Sferinės harmonikos deskriptoriaus sukūrimo algoritmas

Objekto deskriptorius sukuriamas šiais etapais (Kazhdan M., Funkhouser T., Rusinkiewicz S. *et al.* 2003):

6. Poligoninės plokštumos yra atvaizduojamos baigtiniame $2R \times 2R \times 2R$ volumetrinių pikselių (angl. *voxel – volumetric pixel*) tinkle (angl. *rasterization*). Kiekvienam

volumetriniam pikseliui, kuriame yra tam tikras poligoninės plokštumos ilgis, priskiriama reikšmė 1, jeigu plokštumos jame nėra 0. Įprastai naudojama $R \sim 32$.

7. Volumetrinių pikselių tinklas nagrinėjamas kaip binarinė realiųjų reikšmių funkcija. Ji apibrėžiama kaip taškų, kurių ilgis ne didesnis kaip R , rinkinys. Tokia funkcija užrašoma sferinėse:

$$f(r, \theta, \phi) = \text{VOXEL}(r \sin \theta \cos \phi + R, r \cos \theta + R, r \sin \theta \sin \phi + R) \quad (3)$$

kur $r \in [0; R]$, $\theta \in [0, \pi]$, $\phi \in [0; 2\pi]$.

Skirtingi spinduliai apribojami, sukuriant sferinių funkcijų kolekciją (angl. *collection of spherical functions*) $\{f_0, f_1, \dots, f_R\}$: $f_r(\theta, \phi) = f(r, \theta, \phi)$ (4)

8. Sferinės funkcijos reikalauja išreikšti kiekvieną funkciją f_r kaip skirtingų dažnių suma:

$$f_r(\theta, \phi) = \sum_m f_r^m(\theta, \phi), \quad (5)$$

$$\text{kur } f_r^m(\theta, \phi) = \sum_{n=-m}^m a_{mn} \sqrt{\frac{(2m+1)(m-|n|)!}{4\pi(m+|n|)!}} P_{mn}(\cos \theta) e^{in\phi} \quad (6)$$

Funkcija f_r^m yra funkcijos f_r projekcija m nesumažintų sukimosi modelio atvaizdavimų sferinės funkcijos plokštumoje.

9. Skirtingi nesumažinti atvaizdavimai yra fiksuojami prieš pradedant pasukimą ir pasukimas nepakeičia norminės funkcijos L_2 . Jeigu funkcija f_r pasukama, jos reikšmė $\|f_r^m\|$ nepakinta. Nekintanti f_r funkcijos išraiška užrašoma skaliarų kolekcija $\{\|f_r^0\|, \|f_r^1\|, \dots\}$. (7)

10. Šių skirtingų funkcijos išraiškų kombinacijos skirtingų spindulių atžvilgiu sukuria dvimatę nekintančią pasukimo išraišką – trimatį modelių sferinės funkcijos deskriptorių (angl. *spherical harmonics descriptor*), kurios reikšmė priklauso nuo indekso (r_0, m_0) ir m_0 -ojo dažnio ilgio, nuo f funkcijos ribos iki sferos, kurios spindulys lygus r_0 .

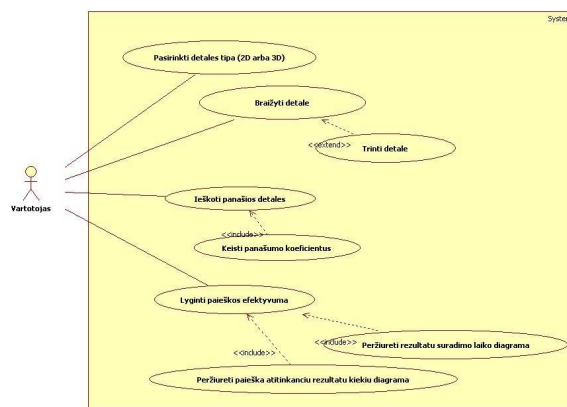
Norint palyginti du sferinės funkcijos deskriptorius, reikia paskaičiuoti Euklido atstumą (angl. *Euclidean distance*) tarp jų (Kelly B. et al. 2000, Kazhdan M., Funkhouser T., Rusinkiewicz S. et al. 2004). K geriausiai atitinkančių užklausą rezultatų paieška yra ekvivalenti K artimiausių kaimynų daugiadimensinėje erdvėje problemos (angl. *K nearest – neighbors problem in high-dimensional space*) sprendimui. Tačiau galima atvaizduoti šį uždavinį ir vienos dimensijos erdvėje. Tai vykdoma dviem būdais. Pirmuoju būdu apskaičiuojama apatinė nuotolio tarp užklausos modelio ir visų kitų duomenų saugyklos modelių riba – surandama M artimiausių kaimynų erdvės projekcijoje į koordinačių ašis ($M > K$). Antruoju būdu paskaičiuojamas realus atstumas iki modelių, išrikiuotų pagal apatinę nuotolio ribą. Skaičiavimas sustabdomas, kai atstumas iki einamojo K -tojo artimiausio

modelio yra mažesnis nei likusių modelių apatinė riba. Skaičiuojant realų atstumą, pradžioje naudojama pagrindinė sferinė funkcija – tokiu būdu atrenkami tik labiausiai užklausą atitinkantys rezultatai.

Algoritmo realizavimo rezultatai

Algoritmas realizuojamas kaip AUTOCAD makrokomanda. Sukurta programa gali atlikti šias funkcijas: parinkti detalės tipą (dvimatis ar trimatis objektas – kol kas realizuotas tik dvimačių objektų deskriptoriaus generavimo mechanizmas), braižyti užklausos detalę (trinti ją), ieškoti panašios detalės, lyginti paieškos efektyvumą. Paieškos efektyvumo panaudos atvejais kol kas nerealizuotas, todėl reikalauja vartotojo analizės.

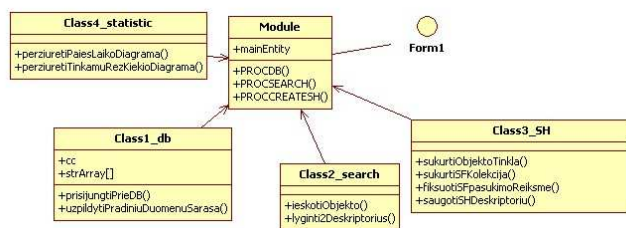
Paieškos efektyvumas lyginamas pagal du kriterijus: rezultatų suradimo laiką ir rezultatų atitikimą. Pirmasis kriterijus įvertinamas pagal užklausos vykdymo laiką – jis priklauso dalinai nuo naudojamos techninės įrangos parametrų. Antrasis – reikalauja vartotojo vaizdinio įvertinimo – yra subjektyvus, kadangi užklausos rezultatai dviejų vartotojų gali būti skirtingai vertinami.



4 pav. Programos panaudos atvejai.

Fig. 4. Use cases of the system.

Programa pagrįsta MVC architektūra (angl. *Model – View – Control*). Išskiriami trys pagrindiniai moduliai: grafinė vartotojo sąsaja, duomenų apdorojimo modulis bei duomenų patikrinimo modulis. Naudojamos klasės: *Class1_db* – prisijungimo prie duomenų bazės klasė; *Class2_search* – duomenų paieškos klasė, naudoja „*K artimiausių kaimynų*“ algoritmą; *Class3_SH* – pagal nuskaitytą kontūrą generuoja sferinės harmonikos deskriptorių. Visos klasės apjungiamos moduliu, kuris vykdo duomenų korektiškumo patikrinimą (kontrolieriaus vaidmuo). Grafinė vartotojo sąsaja generuojama *form1* modulyje.



5 pav. Programos klasių diagrama.

Fig. 5. Class diagram of the system.

Programos veikimas analizuojamas su dviejų tipų dvimačiais grafiniais objektais: nesudėtingomis grafinėmis figūromis (pvz., trikampis, kvadratas, apskritimas) bei su sudėtingomis grafinėmis figūromis (pvz., mechaninės detalės projekcija).

Paieškos efektyvumas įvertinamas pagal užklauso vykdyimo laiko kriterijų. Naudojamos techninės įrangos parametrai: procesorius Inter Core Duo, taktinis dažnis 2.10 GHz,, 2.99 GB RAM. Naudojama duomenų bazė – Microsoft Office Access, duomenų lentelėje yra šie atributai: pirminis raktas ID (sveikųjų skaičių duomenų tipo – priskiriamas automatiškai), antrinis raktas SHID (sferinės harmonikos deskriptoriaus reikšmė), PATH (tekstinė eilutė, kurioje nurodomas kelias iki pasirinkto modelio failo). Duomenų bazėje naudojamos dvi skirtingos duomenų lentelės – vienoje yra 10 įrašų, kitoje – 50.

Atliktas bandymų kiekis – 10, gauti rezultatai pateikiami lentelėje. Kiekvienai užklausiai pateikiama po 3 labiausiai atitinkančius grafinius objektus.

Užklauso ID	Objekto tipas	Užklauso vykdyimo laikas 1-oje lentelėje	Užklauso vykdyimo laikas 2-oje lentelėje
1	Paprastas	25 sek.	35 sek.
2	Sudėtinis	30 sek.	73 sek.
3	Paprastas	20 sek.	38 sek.
4	Sudėtinis	60 sek.	93 sek.
5	Paprastas	21 sek.	63 sek.
6	Paprastas	30 sek.	45 sek.
7	Paprastas	30 sek.	52 sek.
8	Sudėtinis	80 sek.	106 sek.
9	Sudėtinis	50 sek.	67 sek.
10	Sudėtinis	59 sek.	62 sek.

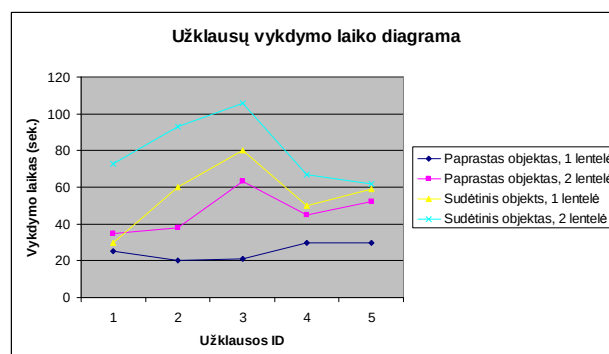
2 lentelė. Paieškos užklauso efektyvumas pagal paieškos vykdyimo laiką dviejose skirtingų įrašų kiekių lentelėse. Lentelės atributai: užklauso ID – užklauso objekto identifikatorius; objekto tipas – paprastas grafinis objektas arba sudėtingas grafinis modelis; užklauso vykdyimo laikas 1-oje lentelėje – vykdyimo laikas; kai nagrinėjama 10 įrašų objektų lentelė, užklauso vykdyimo laikas 2-oje lentelėje – užklauso vykdyimo laikas, kai nagrinėjama 50 įrašų duomenų lentelė.

Table 2. The efficiency of queries by search time in two different scope tables. The attributes of the table: *query ID* – ID of the query object, *object type* – simple graphical object or complex graphical object, *search time in 1st table* – search time in table with 10 records, *search time in 2nd table* – search time in table with 50 records.

Pagal gautus rezultatus galima teigti, jog paieškos vykdyimo laikas priklauso nuo dviejų veiksnių: objekto tipo bei nagrinėjamos duomenų lentelės dydžio.

Jeigu objekto tipas yra *paprastas*, vidutinis užklauso vykdyimo laikas pirmoje lentelėje yra 25.2 sekundės, o antroje lentelėje – 46.6 sekundės. Kuo daugiau įrašų duomenų bazėje, tuo daugiau laiko užtrunka grafinių objektų paieška – reikia peržiūrėti daugiau objektų įrašų.

Jeigu objekto tipas yra *sudėtinis*, vidutinis užklauso vykdyimo laikas pirmoje lentelėje yra 55.8 sekundės, o antroje lentelėje – 80.2 sekundės.



6 pav. Užklauso vykdyimo laiko diagrama.

Fig. 6. Search time diagram.

Sferinės harmonikos deskriptoriaus sukūrimo algoritmas įvertinamas yra pagal rezultatų atitikimą. Šis kriterijus subjektyvus, priklauso nuo vartotojo matomo vaizdo interpretacijos. Atliktas bandymų kiekis – 10, gauti rezultatai pateikiami lentelėje (bandymų sąlygos tos pačios). Kiekvienai užklausiai pateikiama po 3 labiausiai atitinkančius grafinius objektus.

ID	Užklauso objektas	1 rezultatas	2 rezultatas	3 rezultatas
1				
2				
3				
4				
5				

6				
7				
8				
9				
10				

2 lentelė. Paieškos užklausų efektyvumas pagal objektų panašumą dviejose skirtingų įrašų kiekių lentelėse. Lentelės atributai: užklausos ID – užklausos objekto identifikatorius; užklausos objektas – užklausos grafinis objektas; 1 rezultatas, 2 rezultatas, 3 rezultatas – atrinkti pagal deskriptorius rezultatai.

Table 2. The efficiency of queries by results similarity in two different scope tables. The attributes of the table: query ID – ID of the query object, query object – graphic object, result 1, result 2, result 3 – three first search results.

Pagal gautus rezultatus galima teigti, jog sferinės harmonikos funkcijos deskriptorius ne visada randa geriausiai atitinkančius paieškos užklausą grafinius objektus. Pagrindinis trūkumas – algoritmas neatsižvelgia į skylės objekte – atrinka juos pagrindiniai pagal objekto kontūrą. Kitas trūkumas – pirmas atrenkamas ne visada pats labiausiai užklausą atitinkantis elementas – tokiu atveju realizuotas “Kartimiesių kaimynų” algoritmas gali būti klaidingai suformuluotas.

Išvados

Norint atlikti objektų panašumo tyrimą bei jų paiešką, reikia turėti pakankamai didelę dvimačių grafinių objektų saugyklą. Tos saugyklos objektai - grafiniai modeliai, kurių kiekvienas apibūdinamas tam tikru sferinės harmonikos funkcijos deskriptoriumi. Kita būtina sąlyga: atitinkamas deskriptorių kūrimo mechanizmas, kuris suindeksuoja visus duomenų bazės grafinius objektus. Jeigu mechanizmas sukurtas taisyklingai, jis sukuria formos deskriptorių, kuris yra unikalus ir pakankamai tiksliai apibūdina dvimačio arba trimačio grafinio objekto formą.

Sukurta AUTOCAD makrokomanda atrinka grafinius objektus pagal sferinės harmonikos deskriptorius. Atlikus 10 bandymų, pagal gautus rezultatus galima teigti, jog paieškos vykdymo laikas priklauso nuo dviejų veiksnių: objekto tipo bei nagrinėjamos duomenų lentelės dydžio.

Palyginus su paprasto tipo grafiniais objektais, sudėtingų grafinių objektų deskriptoriaus sukūrimo laikas prailgėja

dvigubai. Tai įvyksta dėl to, kad sudėtinio grafinio objekto kontūras yra sudėtingesnis, sudarytas iš daugelio paprastų grafinių figūrų. Tokiu atveju ir sferinės harmonikos deskriptorius tampa sudėtingesnis – ilgiau užtrunka jį paskaičiuoti. Vykdomo laiko svyravimai galimi dėl objekto sudėtingumo ir naudojamos techninės įrangos procesoriaus apkrovimo.

Deskriptoriaus algoritmas turi trūkumų – objektai nepilnai atitinka paieškos užklausą. Deskriptorius neatsižvelgia į skylės objekte, ne visada pirmas atrenkamas geriausiai paieškos užklausą atitinkantis rezultatas.

Literatūra

- Lee, J.; Funkhouser, T. 2008. Sketch-Based Search and Composition of 3D Models, *EUROGRAPHICS Workshop on Sketch-Based Interfaces and Modeling*.
- Fehr, J.; Burkhard, H. 2007. Harmonic Shape Histograms for 3D Shape Classification and Retrieval, *IAPR Conference on Machine Vision Applications*. Tokyo, Japan, 2007.
- Xin, G.; Zha, H. 2007. A 3D Shape Descriptor Base don Hadamard Transform and Spherical Harmonic Transform, *MVA2007 IAPR Conference on Machine Vision Applications*. Tokyo, Japan, 2007.
- Funkhouser, T.; Kazhdan M.; Min P.; Shilane P. 2006. Shape-based Retrieval and Analysis of 3D Models, *Communications of the ACM*: 58-64.
- Pu J.; Ramani K. 2006. On Visual Similarity Based 2D Drawing Retrieval, *Computer-Aided Design* No. 38: 249-259.
- Shilane P.; Funkhouser T. 2006. Selecting Distinctive 3D Shape Descriptors for Similarity Retrieval, *Shape Modeling International*. Department of Computer Science, Princeton University.
- Funkhouser, T.; Kazhdan M.; Shilane P.; Min P.; Kiefer W.; Tal A.; Rusinkiewicz S.; Dobkin D. 2004. Modeling by Example, *ACM Transactions on Graphics*. Los Angeles, CA.
- Kazhdan M.; Funkhouser T.; Rusinkiewicz S. 2004. Symmetry Descriptors and 3D Shape Matching, *Eurographics Symposium on Geometry Processing*.
- Funkhouser T.; Min P.; Kazhdan M.; Chen J.; Halderman A.; Dobkin D.; Jacobs D. 2003. A Search Engine for 3D Models, *ACM Transactions on Graphics*: 83-105.
- Kazhdan M.; Funkhouser T.; Rusinkiewicz S. 2003. Rotation Invariant Spherical Harmonic Representation Of 3d Shape Descriptors, *Eurographics Symposium on Geometry Processing*.
- Kazhdan M.; Funkhouser T. 2002. Harmonic 3D Shape Matching, *SIGGRAPH 2002 Technical Sketches*: 191.
- Osada R.; Funkhouser T.; Shazelle B.; Dobkin D. 2002. Shape Distributions, *ACM Transactions on Graphics*: 807-832.
- Osada R.; Funkhouser T.; Chazelle B.; Dobkin D. 2001. Matching 3D Models with Shape Distributions, *Shape Modeling International*. Genova, Italy, 2001.
- Calvert, J. B. 2001. *An accessible introduction to spherical harmonics* [žiūrėta 2010 03 11]. Prieiga per Internetą: <http://mysite.du.edu/~jcalvert/math/harmonic/harmonic.htm>
- Belongie, S.; Malik J.; Puzicha J. 2002. Shape Matching and Object Recognition Using Shape Contexts, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* Vol. 24, No. 24.
- Kelly, B. 2000. Using metadata to Improve Local Searching, *Exploit Interactive*.
- Search Engine Research, Princeton Shape Retrieval and Analysis Group. 1998-dabar. *Graphics & Geometry Group*, Computer Science Department, Princeton University.

Citizendium: *Spherical harmonics* [žiūrėta 2010 03 11]. Prieiga per Internetą:

<http://en.citizendium.org/wiki/Spherical_harmonics>

Projekto techninė dokumentacija: *OpenGL Spherical harmonics demo* [žiūrėta 2010 03 11]. Prieiga per Internetą:

<<http://www.paulsprojects.net/opengl/sh/sh.html>>

Becker, T. W. 2010. Spherical harmonics visualizations, Department of Earth Sciences, University of Southern California, Los Angeles [žiūrėta 2010 03 11]. Prieiga per Internetą: <<http://geodynamics.usc.edu/~becker/teaching-sh.html>>

Paltanavičius, A. 2006. Spherical Harmonics Generator [žiūrėta 2010 03 11]. Prieiga per Internetą: <<http://adomas.org/shg/>>

Loncaric, S.; 1998. A Survey of Shape Analysis Techniques, Department of Electronic Systems and Information Processing, Faculty of Electrical Engineering and Computing, University of Zagreb, *Pattern Recognition* Vol. 31, No. 8: 983-1001.

THE USING of Spherical harmonics Functions in THE descriptors of two dimensional graphic objects

I. Markievicz

Abstract

The possibility of creating spherical harmonics' descriptor for two dimensional objects similarity research, is examined. For this purpose, the possible forms of graphics recognition algorithms and technology are examined. It is found, how to construct the mathematical model of spherical harmonics and how to visualize it in the graphical system. Spherical harmonic functions descriptor creation and using for graphical objects search algorithms are examined. The experimental and theoretical works, realized on graphical objects search engine, are reviewed.

Keywords: the descriptor of graphic object, spherical harmonics, the form of graphic objects similarity research, the search of graphic object.

IŠVADOS

Darbe išnagrinėtas sferinės harmonikos funkcijos deskriptoriaus kūrimo bei panašių grafinių objektų paieškos vykdymo algoritmas. Tam tikslui buvo išanalizuotas sferinės harmonikos matematinis modelis, jo pritaikymas grafinių objektų formos deskriptoriaus kūrimui. Taip pat išnagrinėtas sferinės harmonikos deskriptorių naudojantis *The Princeton Shape Benchmark* internetinis paieškos mechanizmas, kuris palaiko 3D, 2D modelių bei tekstinių reikšminių žodžių užklausas.

Siekiant išanalizuoti sferinės harmonikos deskriptoriaus parametrų parinkimo įtaką grafinių objektų panašumui, buvo realizuota sferinės harmonikos deskriptorių grafiniam objektui sukurianti programa, kuri leidžia taip pat lyginti deskriptorius vieną su kitu bei atrinkti labiausiai užklausą atitinkančius grafinius objektus. Programos prototipas sukurtas VBA programavimo kalba kaip makrokomanda, veikianti AUTOCAD aplinkoje ir naudojanti Microsoft Access duomenų bazę. Sukurta paprogramė atrenka grafinius objektus pagal jų sferinės harmonikos deskriptorius.

Išnagrinėjus teorinius ir praktinius sferinės harmonikos funkcijos deskriptoriaus kūrimo aspektus bei išanalizavus bandymų rezultatus, pateikiamos šios baigiamojo darbo išvados:

1. Kuo tankesnis yra grafinio objekto mazgų tinklas, tuo ilgiau vykdoma tų grafinių objektų paieška. Užklauskos vykdymo trukmė, kai tinklo tikslumas lygus 5 yra trumpesnė, nei kai tikslumas lygus 10. Tinklo tankumas turi įtakos sferinės harmonikos deskriptoriaus reikšmių skaičiui – kuo tikslesnis objekto mazgų tinklas, tuo daugiau apskaičiuojama sferinės harmonikos deskriptoriaus reikšmių. Tokiu atveju užklauskų vykdymo trukmė tampa ilgesnė – reikia palyginti didesnius objektų deskriptorių masyvus.
2. Sferinės harmonikos deskriptoriaus efektyvumas priklauso nuo sferinės harmonikos funkcijos parenkamų l ir m parametrų. Šių kintamųjų reikšmės nusako sferos orbitalinių linijų ir mazgų išsidėstymą. Jeigu orbitalinės linijos išdėstomos tankiau, sferinės harmonikos deskriptorius yra tikslesnis ir detaliau aprašo grafinių objektų formą.
3. Kai $l=3$ ir $m=3$, nagrinėjamų objektų tinklo orbitalinės linijos išsidėsto vertikalioje ilgumos kryptimi. Tokiu atveju sferinės harmonikos deskriptorius nagrinėja tik tuos mazgus, kurie yra išsidėstę jų kryptimi – neatsižvelgia į grafinio objekto viršūnes ir briaunas, kurios yra išsidėsčiusios objekto horizontalioje platumos kryptimi. Pastebėtina, kad šiais atvejais atrinkti buvo ir nevisiškai grafinę užklausą atitinkantys objektai.
4. Kai $l=5$ ir $m=2$, tinklo orbitalinės linijos išsidėsto tolygiai vertikalioje ilgumos bei horizontalioje platumos kryptimi. Tokiu būdu grafinio objekto tinklas yra tankesnis – sferinės harmonikos deskriptorius tampa tikslesnis ir turi daugiau objekto formą apibūdinančių reikšmių.

5. Grafinių objektų forma yra panaši, jeigu Euklido atstumai tarp atskirų jų deskriptoriaus reikšmių yra mažiausi. Kuo mažesni Euklido atstumai tarp užklausos deskriptoriaus ir rezultato deskriptoriaus, tuo grafiniai objektai panašesni. Mažesnės Euklido atstumų reikšmės pastebimos tais bandymų atvejais, kai kuriamas grafinio objekto mazgų yra tankesnis. Pastebėtina, kad sferinės harmonikos deskriptoriaus reikšmės detaliau aprašo grafinį objektą, jeigu jo orbitalinės linijos išsidėsto tolygiai vertikalia ilgumos ir horizontalia platumos kryptimi (kai $l=5$ ir $m=2$) – tokiu atveju Euklido atstumų reikšmės yra mažesnės (grafiniai objektai yra panašesni).

Sferinės harmonikos deskriptoriaus efektyvumas bei grafinių objektų panašumas priklauso nuo šių kriterijų: grafinio objekto tinklo tankumo, deskriptoriaus orbitalinių linijų išsidėstymo. Norint gauti tikslesnius grafinių objektų paieškos rezultatus, reikia kurti kuo tankesnį grafinio objekto tinklą. Be to, grafinio objekto forma aprašoma tiksliau, jeigu jo orbitalinės linijos išsidėsto tolygiai ir vertikalia ilgumos, ir horizontalia platumos kryptimi.

ŽODYNAS

- Deskriptorius** – (angl. *descriptor*) struktūra, apibūdinanti tam tikrą objektą pagal jo savybes ir nusakanti objekto priklausomybę tam tikrai objektų grupei.
- Ilguma** – (angl. *longitude*) kampas tarp dviejų erdvių: vertikalios pradinės atskaitos sistemos plokštumos ir tam tikros lokaliai vertikalios plokštumos, kurioje yra pasirinktas taškas.
- Makrokomanda** – (angl. *macro*) taisyklių rinkinys, kuris nurodo taikomajai programai, kokia veiksmų seka turi būti taikoma tam tikram uždaviniui spręsti. Makrokomandos naudojamos tam tikriems vartotojo veiksmams automatizuoti ar redaguojamiems dokumentams keisti.
- Orbitalė** – (angl. *orbital*) erdvė aplink grafinį objektą, kuri yra nutolusi nuo objekto centro per spindulį r . Orbitalinės linijos yra išsidėsčiusios ilgumos ir platumos kryptimi.
- Platuma** – (angl. *latitude*) kampas tarp horizontalios pradinės atskaitos sistemos plokštumos ir tam tikros lokaliai horizontalios plokštumos, kurioje yra pasirinktas taškas.
- Programos prototipas** – (angl. *prototype*) pavyzdinė programa, skirta tyrimui atlikti, pagal kurią kuriamos visos vėlesnės tokios programos.
- Sferinės harmonikos funkcija** – (angl. *spherical harmonics*) funkcija, kuri yra Laplace'o diferencialinės lygties sprendinys; ši funkcija užrašoma pasitelkus sferinę simetriją:
- $$\left[\frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} + \lambda \right] Y(\theta, \phi) = 0, \quad (13)$$
- kur λ – separacijos konstanta, o $\{\theta, \phi\}$ - sferinės koordinatų sistemos konstantos.

LITERATŪRA

1. Belongie S., Malik J., Puzicha J. Shape Matching and Object Recognition Using Shape Contexts – *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002. Vol. 24, nr. 24.
2. Blanco M. A., Flórez M., Bermejo M.. Evaluation of the rotation matrices in the basis of real spherical harmonics. *Journal of Molecular Structure: THEOCHEM*, 1997. Vol. 419, nr. 1-3, p. 19-27. Peržiūrėta 2010-05-31. Prieiga per internetą: <http://www.sciencedirect.com>.
3. Brechbuhler Ch., Gerig G., Kubler O. Parametrization of closed surfaces for 3-D shape description. Communication Technology Laboratory, Image Science, Swiss Federal Institute of Technology (ETH). Zurich, Šveicarija. 1996.
4. Burkhard H., Fehr J. Harmonic Shape Histograms for 3D Shape Classification and Retrieval. *IAPR Conference on Machine Vision Applications*, Tokyo, Japonija. 2007. Peržiūrėta 2010-05-31. Prieiga per internetą: <http://www.cs.sunysb.edu/~ial/content/papers/2005/Zhang2005cvpr2.pdf>.
5. Calvert J.B. An accessible introduction to spherical harmonics. 2001. Peržiūrėta 2010-05-31. Prieiga per internetą: <http://mysite.du.edu/~jcalvert/math/harmonic/harmonic.htm>.
6. Citizendium: Spherical harmonics. http://en.citizendium.org/wiki/Spherical_harmonics. Peržiūrėta 2010-05-31.
7. Funkhouser T., Kazhdan M., Min P., Chen J., Halderman A., Dobkin D., Jacobs D. A Search Engine for 3D Models – *ACM Transactions on Graphics*. 2003. p. 83-105. Peržiūrėta 2010-05-31. Prieiga per internetą: <http://www.cs.princeton.edu/~funk/tog03.pdf>.
8. Funkhouser T., Kazhdan M., Min P., Shilane P. Shape-based Retrieval and Analysis of 3D Models. *Communications of the ACM*. 2006. p. 58-64. Peržiūrėta 2010-05-31. Prieiga per internetą: <http://www.cs.princeton.edu/~funk/cacm05.pdf>.
9. Funkhouser T., Kazhdan M., Shilane P., Min P., Kiefer W. Tal A., Rusinkiewicz S., Dobkin D. Modeling by Example. *ACM Transactions on Graphics*, Los Angeles, CA. 2004. Peržiūrėta 2010-05-31. Prieiga per internetą: <http://www.cs.princeton.edu/~funk/sig04a.pdf>.
10. Funkhouser T., Lee J. Sketch-Based Search and Composition of 3D Models. *EUROGRAPHICS Workshop on Sketch-Based Interfaces and Modeling*. 2008. Peržiūrėta 2010-05-31. Prieiga per internetą: <http://www.cs.princeton.edu/~funk/sbim08.pdf>.
11. Inghhoff T., Fritzsche S., Fricke B. Maple procedures for the coupling of angular momenta. IV. Spherical harmonics. *Computer Physics Communications*, 2001. Vol. 139, nr. 9-10, p. 297-313. Peržiūrėta 2010-05-31. Prieiga per internetą: <http://www.sciencedirect.com>.
12. Iyer N., Jayanti S., Lou K., Kalyanaraman Y, Ramani K. Three-dimensional shape searching: state-of-the-art review and future trends. *Computer-Aided Design*, 2005. Vol. 37, nr. 5, p. 509-530.

13. Karp A. H. Recent advances in the spherical harmonics method. *International Journal of Engineering Science*, 1998. Vol. 36, nr. 12-14, p. 1551-1568. Peržiūrėta 2010-05-31. Prieiga per internetą: <http://www.sciencedirect.com>.
14. Kazhdan M., Funkhouser T. Harmonic 3D Shape Matching – *SIGGRAPH 2002 Technical Sketches*. 2002. p. 191. Peržiūrėta 2010-05-31. Prieiga per internetą: http://www.cs.princeton.edu/gfx/proj/shape/s2002_kazhdan_ts.pdf.
15. Kazhdan M., Funkhouser T., Rusinkiewicz S. Symetry Descriptors and 3D Shape Matching. *Eurographics Symposium on Geometry Processing*. 2004. Peržiūrėta 2010-05-31. Prieiga per internetą: http://www.cs.princeton.edu/gfx/pubs/Kazhdan_2004_SDA/SGP04.pdf.
16. Kazhdan M., Funkhouser T., Rusinkiewicz S. Rotation Invariant Spherical Harmonic Representation Of 3d Shape Descriptors. *Eurographics Symposium on Geometry Processing*. 2003.
17. Kelly B., Using metadata to Improve Local Searching. *Exploit Interactive*. 2000.
18. Kounchev O. Compendium on spherical harmonics and polyharmonic functions. *Multivariate Polysplines*, 2001. p. 129-185.
19. Loncaric S.. A Survey of Shape Analysis Techniques. Department of Electronic Systems and Information Processing, Faculty of Electrical Engineering and Computing, University of Zagreb. 2000.
20. Mak L., Grandison S., Morris R. J. An extension of spherical harmonics to region-based rotationally invariant descriptors for molecular shape description and comparison. *Journal of Molecular Graphics and Modelling*, 2008. Vol. 26, nr. 7, p. 1035-1045.
21. Modest M. F., Yang J.. Elliptic PDE formulation and boundary conditions of the spherical harmonics method of arbitrary order for General three-dimensional geometries. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2008. Vol. 109, nr. 9, p. 1641-1666. Peržiūrėta 2010-05-31. Prieiga per internetą: <http://www.sciencedirect.com>.
22. Mousa M.-H., Chaine R., Akkouche S., Galin E. Toward an efficient triangle-based spherical harmonics representation of 3D objects. *Computer Aided Geometric Design*, 2008. Vol. 25, nr. 8, p. 561-575.
23. OpenGL Spherical harmonics demo – projekto techninė dokumentacija. Peržiūrėta 2010-05-31. Prieiga per internetą: <http://www.paulsprojects.net/opengl/sh/sh.html>.
24. Osada R., Funkhouser T., Chazelle B., Dobkin D. Matching 3D Models with Shape Distributions. *Shape Modeling International*, Genova, Italy, 2001. Peržiūrėta 2010-05-31. Prieiga per internetą: <http://www.cs.princeton.edu/~funk/smi01.pdf>.
25. Osada R., Funkhouser T., Shazelle B., Dobkin D. Shape Distributions. *AMC Transactions on Graphics*. 2002. p. 807-832. Peržiūrėta 2010-05-31. Prieiga per internetą: <http://www.cs.princeton.edu/~funk/tog02.pdf>.

26. Pu J., Ramani K. On Visual Similarity Based 2D Drawing Retrieval. *Computer-Aided Design*, 2006. Nr. 38, p. 249-259.
27. Ricard J., Coeurjolly D., Baskurt B. Generalizations of angular radial transform for 2D and 3D shape retrieval. *Pattern Recognition Letters*, 2005. Vol. 26, nr. 14, p. 2174-2186.
28. Schaeben H., van den Boogaart G. K. Spherical harmonics in texture analysis. *Tectonophysics*, 2003. Vol. 370, nr. 1-4, p. 253-268. Peržiūrėta 2010-05-31. Prieiga per internetą: <http://www.sciencedirect.com>.
29. Schmidt M., Fabert O., Shum C. K. On the estimation of multi-resolution representation of the gravity field based on spherical harmonics and wavelets. *Journal of Geodynamics*, 2005. Vol. 39, nr. 5, p. 512-526. Peržiūrėta 2010-05-31. Prieiga per internetą: <http://www.sciencedirect.com>.
30. Search Engine Research, Princeton Shape Retrieval and Analysis Group. *Graphics & Geometry Group, Computer Science Department, Princeton University*. 1998 – 2010.
31. Shilane P., Funkhouser T. Selecting Distinctive 3D Shape Descriptors for Similarity Retrieval. Department of Computer Science, Princeton University, Shape Modeling International. 2006. Peržiūrėta 2010-05-31. Prieiga per internetą: http://www.cs.princeton.edu/gfx/pubs/Shilane_2006_SD3/shilane-smi06.pdf.
32. Spherical Harmonics Generator – techninė dokumentacija ir kodo pavyzdžiai. Peržiūrėta 2010-05-31. Prieiga per internetą: <http://adomas.org/shg/>.
33. Thorsten Becker. Sferinės harmonikos funkcijos animacija. Peržiūrėta 2010-05-31. Prieiga per internetą: <http://geodynamics.usc.edu/~becker/teaching-sh.html>.
34. Xin G., Zha H.. A 3D Shape Descriptor Based on Hadamard Transform and Spherical Harmonic Transform. *MVA2007 IAPR Conference on Machine Vision Applications*. Tokyo, Japonija. 2007.
35. Zhou K., Bao H., Shi J. 3D surface filtering using spherical harmonics. *Computer-Aided Design*, 2004. Vol. 36, nr. 4, p. 363-375. Peržiūrėta 2010-05-31. Prieiga per internetą: <http://www.sciencedirect.com>.