

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Datorzinātnes un informācijas tehnoloģijas fakultāte
Lietišķo datorsistēmu institūts

Vitālijs ZABIŅAKO
Doktora studiju programmas „Datorsistēmas” doktorants

**GRAFU VIZUALIZĀCIJAS METOŽU ANALĪZE UN IZSTRĀDE
TRĪSDIMENSIJU TĒLPĀ**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
Dr.sc.ing., asociētais profesors
P.RUSAKOVS

Rīga 2012

UDK 519.17+004.921.021](043.2)
Za 016 g

Zabiņako V. Grafu vizualizācijas metožu analīze un izstrāde trīsdimensiju telpā. Promocijas darba kopsavilkums.-R.:RTU, 2012.-38 lpp.

Iespiests saskaņā ar Rīgas Tehniskās universitātes Datorzinātnes un informācijas tehnoloģijas fakultātes Lietišķo datorsistēmu institūta padomes 2012. gada 26. jūnija lēmumu, protokols Nr. 77.



Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā „Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai”.

ISBN 978-9934-10-376-6

**PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS
RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ
INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI**

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2012. gada 12. decembrī Rīgas Tehniskās universitātes Datorzinātnes un informācijas tehnoloģijas fakultātē, Meža ielā 1/3, 202. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI:

Profesors, Dr.habil.sc.ing. Jānis Grundspenķis
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

Profesors, Dr.sc.comp. Kārlis Čerāns
Latvijas Universitāte, Latvija

Profesors, Dr.habil.sc.ing. Gintautas Dzemyda
Viļņas Universitāte, Lietuva

APSTIPRINĀJUMS

Es apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Vitālijs Zabiņako..... (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā un sastāv no ievada, 4 nodaļām, secinājumiem, bibliogrāfiskā saraksta un 2 pielikumiem. Promocijas darba pamatteksts ir 145 lappuses, tas satur 121 attēlu un 16 tabulas. Bibliogrāfiskais saraksts satur 129 nosaukumus.

Satura rādītājs

1. VISPĀRĒJAIS DARBA APRAKSTS.....	5
1.1. TĒMAS AKTUALITĀTE.....	5
1.2. DARBA MĒRĶIS UN UZDEVUMI	7
1.3. PĒTĪJUMA OBJEKTS UN SUBJEKTS	7
1.4. PĒTĪJUMA METODES	7
1.5. TEORĒTISKĀ VĒRTĪBA	7
1.6. PRAKTISKĀ NOZĪME UN APROBĀCIJA.....	8
1.7. DARBA STRUKTŪRA	10
2. DARBA NODAĻU SATURA APKOPOJUMS.....	12
2.1. GRAFU VIZUALIZĀCIJAS PAMATKONCEPCIJAS	12
2.2. GRAFU VIZUALIZĀCIJAS IZMANTOŠANA LIETOTĀJA UZDEVUMU RISINĀŠANAI	16
2.3. VIZUALIZĀCIJAS METOŽU IZSTRĀDE	17
2.4. PIEDĀVĀTO UZLABOJUMU PIELIETOŠANA.....	25
2.4.1. Eksperimenti ar Kriminālprocesu informācijas sistēmas prototipa datiem.....	25
2.4.2. Uz spēku iedarbību pamatotās pieejas izmantošana datu klasterizācijai	28
2.4.3. Eksperimenti ar sākotnējo vizuālo analīzi	30
2.4.4. Uz krāsu pamatotu magnētisko spēku pielietošanas gadījuma analīze	32
3. SECINĀJUMI	33
LITERATŪRA.....	36

1. Vispārējais darba apraksts

1.1. Tēmas aktualitāte

Informācijas koncepcija un tās datorizētā pārvaldība kļuva par dominējošo pētījumu tēmu pēdējās dažās dekādēs, it īpaši IT (Informācijas tehnoloģijas) ietvaros. Lielākā daļa no eksistējošiem programmatūras risinājumiem, kuri nodrošina informācijas glabāšanu un apstrādi, ir saistīta ar objektu kopu, to īpašību un savstarpējo attiecību izpēti, ar nolūku iegūt lietderīgus spriedumus konkrētajos zināšanu domēnos. Datu apstrāde var variēt no automātiskās (gadījumā, kad lietotājs sniedz sistēmai ievaddatus un uzskata to apstrādi par līdzvērtīgu „melnās kastes” modelim) līdz pilnīgi manuālās (kad pats lietotājs pilnībā pārvalda datu apstrādes soļu secību un saturu), savukārt automatizētās metodes atrodas pa vidu starp šīm divām diametrāli pretējām pieejām. Jebkurā variantā, izņemot pilnīgi automātisko, lietotājam ir nepieciešams dināmiskais ieskaits, kurš ļauj novērtēt pētāmās informācijas struktūru un pašreizējo stāvokli, lai būtu iespēja veikt to analīzi, apstrādes pārvaldību, kā arī attiecīgu secinājumu izdarīšanu.

Līdzīgi kā citās jomās, kuras paredz cilvēka iesaistīšanos, mijiedarbība starp lietotāju un datoru ir lielā mērā atkarīga no vizuālās atgriezeniskās saites, kā arī kognitīvu un izpratnes procesu kvalitātes. Tas kļuva par cēloni jaunas zinātnes – „informācijas vizualizācijas” izveidošanai, kura mēģina rast efektīvas metodes tādu problēmu atrisināšanai, kuras ir saistītas ar zinātniskiem pētījumiem, datizraci, finanšu datu analīzi, loģistiku, tiesību aizsardzību un vairākām citām, lai ļautu lietotājam apskatīt, izpētīt un saprast lielus informācijas apjomus vienlaicīgi [21].

Nenoliedzami, pilna datu tipu, attiecīgo vizualizācijas metožu, kā arī algoritmu un tehniku kopa ir pārāk liela, lai būtu iespēja aptvert to viena akadēmiskā pētījuma ietvaros, tāpēc tika pētīta specifiskā problēma – to objektu un to savstarpējo attiecību vizualizācija, kuras iekļaujas grafa matemātiskajā jēdzienā. Kā ir zināms, grafveida struktūras eksistē visos minētajos un vairākos citos problēmu apgabalos, reprezentējot diagrammas, datu plūsmas, elementu izkārtojumus, tīklu topoloģijas utt.

Primārais aspekts, kurš ir svarīgs jebkura grafa attēlošanai, ir saistīts ar to elementu efektīvu telpisko izvietojumu, kurš atbilst estētiskiem kritērijiem (piemēram – minimālā šķautņu krustošana, maksimālā simetrija) un vienlaicīgi uzsver informācijas īpašības, kuras var būt atkarīgas no veicamā uzdevuma (piemēram – tiešā veidā izceļot hierarhiskās struktūras, ja grafa ietvaros eksistē raksturīgas priekšteču un pēcteču attiecību kopas).

Pašreiz eksistē algoritmu kopa, kura ļauj panākt grafa elementu pozīciju automātisko izskaitļošanu, pamatojoties uz grafa aprakstošo informāciju – kaimiņu sarakstiem, incidences matricām, vai jebkurām citām datu struktūrām, kuras ļauj definēt konkrētā grafa topoloģiju [5], [6], [18], [20]. Galvenā eksistējošo algoritmu problēma ir saistīta ar to faktu, ka katrs no tiem vislabāk darbojas ar specifiskām atbilstošām grafu struktūrām. Tāpēc neveiksmīgas kombinācijas izvēle bieži rada vizualizācijas nepilnības, kuras nevis atvieglo lietotāja uzdevumu risināšanu, bet var pat traucēt tiem. Vēl viena svarīga problēma ir saistīta ar skaitļošanas sarežģītību, kura ir atkarīga no grafa virsotņu (V) skaita – dažiem algoritmiem, sliktākajā gadījumā, tā var sasniegt pat $\Theta(V^3)$.

Kaut gan grafa elementu telpiskai pozicionēšanai ir vislielākā ietekme uz datu atspoguļošanu, veicot galīgā attēla veidošanu pastāv nepieciešamība izmantot vizualizācijas

tehnikas, kuras ļauj uzlabot grafu uztveres iespējas. Attiecīgās tehnikas var variēt no atomārām operācijām, piemēram – grafa elementu palielināšanas (ar nolūku koncentrēties uz tiem objektiem, kuri tiek pētīti pašreiz) un līdzīgām tehnikām [29] līdz pat sarežģītam vizualizācijas stratēģijām [27], kuras ļauj dināmiski ietekmēt grafa attēlošanas aspektus – objektu krāsu, formu, caurspīdīgumu vai jebkurus citus vizualizācijas elementus, kuri reprezentē informāciju.

Mūsdienas datorgrafikas industrija atbalsta vizualizācijas tehniku implementēšanu, nodrošinot piekļuvi universālajiem lietojumprogrammas interfeisiem (*API – application programming interfaces*), piemēram – *Direct2D / Direct3D, OpenGL, Java 3D* utt., kuras var būt pielāgotas jebkura veida informācijas attēlošanai, tostarp grafveida struktūrām. Līdz ar to, svarīgākie uz vizualizācijas tehnikām attiecināmie faktori ir to savstarpējā savietojamība un pielietošanas secība, nevis konkrētās vizualizācijas tehnoloģijas izvēle un implementācijas īpatnības. Tas pats attiecas arī uz savietojamību starp vizualizācijas tehnikām, izvietojanas algoritmiem un grafa topoloģijām, kurām ir harmoniski jāsavietojas katras vizualizācijas sesijas ietvaros, lai būtu iespēja izveidot modeli, kurš veicina lietotāja specifisku uzdevumu atrisināšanu (tie, savukārt, var būt uz apzināšanu vai uz spriešanu vērsti).

Eksistē informācijas vizualizācijas apakšdisciplīna, kura saucas „vizuālā analītika”. Tā ir orientēta uz spriešanu un lietderīgu secinājumu izveidošanu, pamatojoties uz vizuālo attēlu analīzi. Galvenais uzsvars šajā gadījumā tiek likts uz lietotāja uzdevumu risināšanas veicināšanu, vizuāli akcentējot apslēptas attiecības, kuras nav tieši acīmredzamas citādā veidā, kā arī uz likumsakarību atklāšanu (piemēram – izceļot klasterus) un informācijas meklēšanas pūļu samazināšanu, lokalizējot lielus datu apjomus kompaktajā telpā.

Vēsturiski, grafi un diagrammas tiek attēlotas divdimensiju (*2D – two-dimensional*) plaknēs – grāmatu lappusēs, tāfelēs, plakātos utt. Mūsdienas datorgrafika ne tikai piedāvā iespēju veikt interaktīvas 2D vizualizācijas, bet arī sniedz programmatūras un aparatūras atbalstu trīsdimensiju (*3D – three-dimensional*) scēnu vizualizācijai. Tas ļauj izmantot vienu papildu dimensiju grafu elementu izvietojanai, nodrošinot efektīvāko telpas kapacitātes izmantošanu. Pat neskatoties uz to, ka trešā dimensija tiek projicēta vienkāršajā 2D plaknē, grafa elementu izvietojanas imitācija scēnas „dziļumā” pozitīvi ietekmē lietotāja uztveri, izmantojot dziļuma buferizāciju (*z-buffering*) un sniedzot iespēju veikt grafa modeļa rotācijas trīsdimensiju Eiklīda telpā, kas ir ierasts veids informācijas uztverei pārim „acs–smadzenes”.

Vēl viena svarīga problēma, kura ir aktuāla grafu attēlošanas ietvaros, ir vizualizācijas rezultāta novērtēšana. Šajā gadījumā vienīgā ticama īpašība ir veikspēja, kura var būt izteikta ar formulu un izmērīta kvantitatīvi, piemēram – ar kadru nomaiņas ātrumu sekundē (*FPS – frames per second*). Pretēji tam, grafa vizualizācijas rezultāta kvalitāte ir subjektīva un eksistē tikai daži estētiskuma kritēriji, kuri ļauj spriest, vai konkrētā izvietojanas algoritmu un vizualizācijas tehniku kombinācija, kura tiek pielietota konkrētai grafa topoloģijai, ir labāka vienā vai citā gadījumā [14], [15].

Visas minētas koncepcijas, kuras piedalās vizualizācijas procesā, parasti tiek integrētas vienotās programmatūras sistēmas veidā, kura tiek saukta par grafu vizualizācijas sistēmu (*GVS – graph visualization system*) un sniedz lietotājam saskarni darbībām ar datiem, nodrošinot informācijas uztveri, saprašanu un citu mijiedarbības un vizualizācijas uzdevumu veikšanu, atbilstoši šī lietotāja vajadzībām. Eksistē programmatūras risinājumi, kuri ir speciāli paredzēti šiem nolūkiem – sākot no specifiskiem risinājumiem konkrētās lietošanas jomas ietvaros un beidzot ar vispārīgiem grafu attēlošanas līdzekļiem, piemēram – “*Graphviz*”,

“aiSee”, “yFiles” utt. Neskatoties uz to, pastāv iespēja identificēt atsevišķus GVS arhitektūras moduļus un attiecīgi piemērotu GVS ietvaru. Tā tālākā analīze ļaus veikt eksistējošo un potenciālo GVS risinājumu klasifikāciju un pat piedāvāt teorētiskus pamatus GVS automātiskai konstruēšanai, kura, pieņemot vēlamu grafu vizualizācijas sistēmas īpašību aprakstu kā ievaddatus, varētu ģenerēt atbilstošus GVS.

1.2. Darba mērķis un uzdevumi

Darba mērķis – paplašināt grafu vizualizācijas un analīzes iespējas, piedāvājot uzlabotas un savstarpēji savietojamas izvietojšanas algoritmu un vizualizācijas tehniku versijas, kuras var integrēt un novērtēt atbilstošās grafu vizualizācijas sistēmas ietvaros.

Lai sasniegtu šo mērķi, tika izvirzīti sekojoši **uzdevumi**:

- analizēt teorētiskus pamatus un esošo situāciju grafu vizualizācijas jomā;
- sniegt eksistējošo metožu trūkumu izklāstu un identificēt esošo pieeju potenciālus uzlabojumus;
- uzlabot vizualizācijas metodes, modificējot eksistējošus un izstrādājot jaunus algoritmus un vizualizācijas tehnikas;
- implementēt piedāvātas vizualizācijas metodes;
- sniegt teorētisku pamatojumu GVS automatizētai izveidošanai;
- apliecināt piedāvāto uzlabojumu lietderību, veicot eksperimentus ar reālajiem datiem un novērtējot rezultātus.

1.3. Pētījuma objekts un subjekts

Pētījuma objekts ir informācijas vizualizācijas process un tā atbilstība lietotāja uzdevumiem grafu attēlošanas ietvaros.

Pētījuma subjekts ir grafu izvietojšanas algoritmu, vizualizācijas tehniku un mijiedarbības pieeju kopa, kura tiek integrēta un novērtēta pamatojoties uz datiem par:

- noziedzīgo nodarījumu savstarpējām saistībām, iegūtajām no Kriminālprocesa informācijas sistēmas prototipa, kurš tiek izstrādāts un uzturēts ar Latvijas Republikas Iekšlietu ministrijas Informācijas Centru;
- Latvijas Republikas dzelzceļu infrastruktūru;
- vispārīgo gaisa satiksmes kontroles sistēmas modeli.

1.4. Pētījuma metodes

Darba pētījuma metodes paredz izmantot grafu teoriju, trīsdimensiju datorgrafikas teoriju, matemātisko statistiku, kā arī kognitīvo un uztveres psiholoģiju.

1.5. Teorētiskā vērtība

Promocijas darba teorētiskā vērtība ir sekojoša:

- esošo algoritmu integrācija piedāvātā daļējā hibrīda algoritma modeļa ietvaros, kuram piemīt uzlabota lietojamība, operējot ar dažāda tipa grafiem, salīdzinājumā ar pamatmetodēm;
- vizualizācijas tehniku izstrāde, kuras ļauj uzlabot grafu topoloģijas uztveri un likumsakarību atklāšanu izmantojot klasterizāciju;
- jaunas metodes izstrāde automatizētai vizuālajai interpolācijai ar grafu virsotnēm saistītiem derīgajiem datiem;
- jaunas metodes izstrāde uz krāsu un magnētisko spēku pamatotai mijiedarbībai ar grafu elementiem;
- noskaņojamā GVS modeļa un to moduļu izstrāde grafu vizualizācijas un analīzes nolūkiem;
- specifikācijas izstrāde GVS automatizētās konstruēšanas un formālās novērtēšanas ietvaram.

1.6. Praktiskā nozīme un aprobācija

Darba praktiskā nozīme ir minēto algoritmu un vizualizācijas tehniku uzlabojumu implementācija ar nolūku ļaut vispārīgo un specializēto grafu izpēti un analīzi. Tika veikti eksperimenti ar datiem, kuri ir iegūti no Kriminālprocesa informācijas sistēmas prototipa, kā arī Latvijas Republikas dzelzceļu infrastruktūras apraksta. Rezultātā noformulēti lietderīgie secinājumi attiecīgajās jomās.

Darba rezultāti tika publicēti 13 starptautiski atzītajās publikācijās:

1. Zabiniako V., Rusakov P. Simultaneous Application of Graphs and Heightmaps for Enhanced Spatial Analysis. In: Saeed, K., Abraham, A. (Eds.) International Journal of Computer Information Systems and Industrial Management Applications (IJCISIM). Machine Intelligence Research Labs, ISSN 2150-7988, Vol. 3, 2011, pp. 522–529 (indeksēts „INSPEC” datubāzē).
2. Zabiniako V., Rusakov P. The Definition of Framework for Automated Creation of Graph Visualization Systems. Scientific Proceedings of Riga Technical University, Computer Science, series 5, volume 47, p. 109-115, 2011 (indeksēts „ArnetMiner” datubāzē).
3. Zabiniako V. Using Force-Based Graph Layout for Clustering of Relational Data. In: Grundpenkis, J., Kirikova, M., Manolopoulos, Y., Novickis, L. (Eds.) Advances in Databases and Information Systems (Lecture Notes in Computer Science). Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. pp. 193 – 201 (indeksēts „SpringerLink” datubāzē).
4. Zabiniako V., Rusakov P. Combined Representation of Data with Graphs and Heightmaps for Visual Analysis and Spatial Decision Support. In: Xiao, Y., Muffoletto, R., Amon, T. (Eds.) Proceedings of the IADIS International Conferences. Computer Graphics, Visualization, Computer Vision and Image Processing 2010. Germany: IADIS Press, 2010. pp. 184 – 192 (indeksēts „IADIS digital library” datubāzē).
5. Zabiniako V., Rusakov P. Graph Drawing in Lightweight Software: Conception and Implementation. In: Skala, V., Hitzer, E.M. (Eds.) Proceedings of the

- GraVisMa 2010 Workshop on Computer Graphics, Computer Vision and Mathematics. Czech Republic: Vaclav Skala – Union Agency, 2010. pp. 151 – 154.
6. Zabiniako V., Rusakov P. Supporting Visual Techniques for Graphs Data Analysis in Three-Dimensional Space. In: Butleris, R., Butkiene R. (Eds.) 17th International Conference on Information and Software Technologies IT 2011 (Research Communications). Lithuania: Kaunas University of Technology, 2011. pp. 75-87.
 7. Zabiniako V., Rusakov P. Comparative Analysis of Visualization Aspects in Technologies Direct3D and OpenGL. Scientific Proceedings of Riga Technical University, Computer Science, series 5, volume 26, p. 209-221, 2006.
 8. Zabiniako V., Rusakov P. Analysis of Visualization Problems of Graphs and Models of Graphs. Scientific Proceedings of Riga Technical University, Computer Science, series 5, volume 30, p. 138-148, 2007.
 9. Zabiniako V., Rusakov P. Development and Implementation of Partial Hybrid Algorithm for Graphs Visualization. Scientific Proceedings of Riga Technical University, Computer Science, series 5, volume 34, p. 192-203, 2008.
 10. Zabiniako V., Rusakov P. Definition of General Requirements for Graph Visualization Software. Scientific Proceedings of Riga Technical University, Computer Science, series 5, volume 47, p. 109-115, 2011 (indeksēts „ArnetMiner” datubāzē).
 11. Yershov A., Zabiniako V., Semenchuk P. Using Concatenated Steganography for Visual Analysis in GIS SOA. The 52nd International Scientific Conference of Riga Technical University, Latvia, Riga. October 13, 2011 (pieņemts publicēšanai).
 12. Zabiniako V., Gorbik O. Visualization of Graph-Based Structures for Navigation and Tracking of Real-World Objects. International Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences. E-ISSN 2218-6301 / ISSN 2079-8407, p. 288-294, 2012 (indeksēts „Directory of Open Access Journals” datubāzē).
 13. Zabiniako V., Visualization of Graph Structures with Magnetic-Spring Model and Color-Coded Interaction. Baltic DB & IS 2012. Tenth International Baltic Conference on Databases and Information Systems. 2012, Vilnius, Lithuania (pieņemts publicēšanai).

Attiecīgi rezultāti tika prezentēti 11 starptautiskajās konferencēs:

1. IADIS International Conferences. Computer Graphics, Visualization, Computer Vision and Image Processing 2010, Germany, Freiburg, July 27-29, 2010. Zabiniako V., Rusakov P. Combined Representation of Data with Graphs and Heightmaps for Visual Analysis and Spatial Decision Support.
2. The 51th RTU International Scientific Conference, Latvia, Riga. October 13-15, 2010. Zabiniako V., Rusakov P. The Definition of Framework for Automated Creation of Graph Visualization Systems.
3. GraVisMa 2010 Workshop on Computer Graphics, Computer Vision and Mathematics, Czech Republic, September 7-10, 2010. Zabiniako V., Rusakov P. Graph Drawing in Lightweight Software: Conception and Implementation.
4. 17th International Conference on Information and Software Technologies, IT 2011, Lithuania, April 27-29, 2011. Zabiniako V., Rusakov P. Supporting Visual Techniques for Graphs Data Analysis in Three-Dimensional Space.

5. The 46th Scientific Conference of Riga Technical University, Computer Science, Applied Computer Systems, October, Riga, Latvia, 2005. Zabiniako V., Rusakov P. Comparative Analysis of Visualization Aspects in Technologies Direct3D and OpenGL.
6. The 47th Scientific Conference of Riga Technical University, Computer Science, Applied Computer Systems, October, Riga, Latvia, 2006. Zabiniako V., Rusakov P. Analysis of Visualization Problems of Graphs and Models of Graphs.
7. The 48th Scientific Conference of Riga Technical University, Computer Science, Applied Computer Systems, October, Riga, Latvia, 2007. Zabiniako V., Rusakov P. Development and Implementation of Partial Hybrid Algorithm for Graphs Visualization.
8. The 49th Scientific Conference of Riga Technical University, Computer Science, Applied Computer Systems, October, Riga, Latvia, 2008. Zabiniako V., Rusakov P. Definition of General Requirements for Graph Visualization Software.
9. 13th East European Conference, ADBIS 2009, Riga, Latvia, September 7-10, 2009. Zabiniako V. Using Force-Based Graph Layout for Clustering of Relational Data.
10. The 52-nd RTU International Scientific Conference, Latvia, Riga. October 13, 2011. Yershov A., Zabiniako V., Semenchuk P. Using Concatenated Steganography for Visual Analysis in GIS SOA.
11. Tenth International Baltic Conference on Databases and Information Systems, Lithuania, Vilnius. July 10, 2012. Zabiniako V. Visualization of Graph Structures with Magnetic-Spring Model and Color-Coded Interaction.

Ar darbu saistītie rezultāti tika publicēti arī mācību metodiskajos materiālos ESF projekta „Studiju moduļa izstrāde modeļvadāmai programmatūras attīstības tehnoloģijai datorsistēmas programmā” (līguma Nr. 2007/0080/VPD1/ESF/PIAA/06/APK/3.2.3.2./0008/0007) ietvaros.

1.7. Darba struktūra

Darbā ietilpst ievads, 4 nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts un 2 pielikumi.

Ievadā tiek raksturota izvēlētajā problēmu domēna aktualitāte, definēts darba mērķis, uzdevumi, kā arī pētījuma objekts un subjekts. Tajā tiek arī pārskaitītas izmantotās pētījuma metodes un definēta darba rezultātu un to aprobācijas teorētiskā un praktiskā nozīme.

Pirmā nodaļa „Grafu vizualizācijas pamatkonceptijas” sniedz vizualizācijas teorijas elementu aprakstu, apkopo nozīmīgākus eksistējošus grafu izvietojšanas algoritmus un vizualizācijas tehnikas, kā arī piedāvā attiecīgo teorētisko pamatu aprakstu.

Otrā nodaļa „Grafu vizualizācijas izmantošana lietotāja uzdevumu risināšanai” sniedz vizuālās analīzes un spriešanas piemērus, apraksta saistītus kognitīvus procesus, to saistību ar GVS koncepciju, kā arī piedāvā eksistējošo grafu vizualizācijas risinājumu apkopojumu.

Trešā nodaļa „Vizualizācijas metožu izstrāde” apraksta ar darba autoru piedāvātus uzlabojumus. Tiek specificēti jauni algoritmi, kā arī datu vizualizācijas tehnikas un stratēģijas. Sniegts vispārējās GVS arhitektūras apraksts, piedāvājot šāda veida sistēmu automatizētās konstruēšanas ietvara specifiskāciju.

Ceturtā nodaļa „Piedāvāto uzlabojumu pielietošana” apraksta eksperimentu kopu, kura tika veikta ar darba autoru izstrādāto GVS, pamatojoties uz reālās pasaules problēmu domēnu datiem, kā arī sniedz iegūto rezultātu kopsavilkumu.

Darba noslēdzošā daļa apkopo promocijas darbā sasniegtus rezultātus un definē tālāko potenciālo pētījumu virzienus.

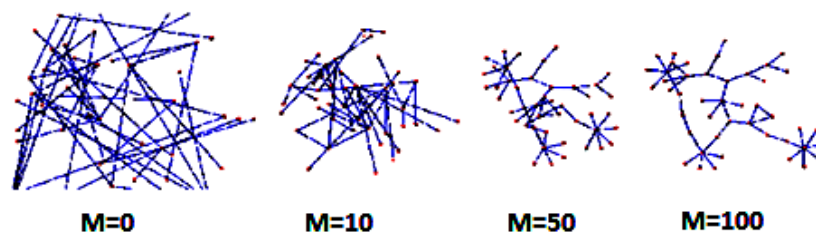
2. Darba nodaļu satura apkopojums

2.1. Grafu vizualizācijas pamatkonceptijas

Šīs nodaļas ietvaros tiek aprakstītas attiecīgas primārās koncepcijas, piemēram vizualizācijas veidu klasifikācija, sarežģītība, abstrakcija un grafu formālās definīcijas, kopā ar eksistējošu grafu izvietošanas algoritmu un vizualizācijas tehniku detalizētu aprakstīšanu.

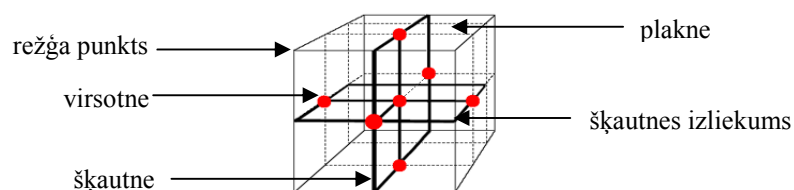
Nodaļas ietvaros tiek aprakstītas četras izvietošanas algoritmu pamatklases – uz spēku iedarbību pamatoti, uz ortogonalitāti pamatoti, uz hierarhisko struktūru pamatoti, kā arī uz radiālo struktūru pamatoti:

1. Uz spēku iedarbību pamatota pieeja ir viena no populārākajām grafu attēlošanas stratēģijām mūsdienās. Šīs pieejas pirmais apraksts tika piedāvāts 1984. gadā ar P. Eidesu [5]. Tika pielietota elektromehāniskās sistēmas koncepcija, reprezentējot grafa virsotnes ar uzlādētiem metāla gredzeniem, šķautnes – ar atsperēm, un ļaujot sistēmai pašai atrast līdzsvara stāvokli, kurš raksturojas ar minimālo enerģiju. Tālākā šīs metodes attīstība tiek aprakstīta uz *Kamada un Kawai algoritma* [8], *Davidson un Harel algoritma* [4], kā arī magnētisko atsperu pieejas pamata, kuru piedāvāja *Koza Sugiyama* [17] utt. Sākotnējā virsotņu izvietošana telpas gadījumā pozīcijās un tālākā iteratīvā grafa ģeometriskā modeļa uzlabošana veido raksturīgo gala rezultāta izveidošanas secību, kura ir līdzīga visām uz spēku iedarbību pamatotiem algoritmiem – sk. 2.1. att.



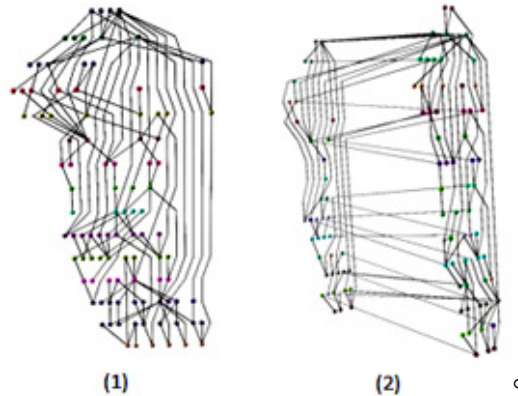
2.1. att. Uz spēku iedarbību pamatota veidošanas secība

2. Uz ortogonalitāti pamatotā pieeja paredz piesaistīt virsotnes un šķautnes ortogonālam režģim, kurš tiek definēts ar veselu skaitļu koordinātēm un pieļauj $n \cdot (\frac{\pi}{2})$, $n \in [1;3]$ šķautņu izliekumus. Attiecīgās metodes pamati tika definēti „*Topology-Shape-Metrics Approach*” ietvara aprakstā [20], [19]. Tā iekļauj trīs pamatetapus, katrs no kuriem nodrošina grafa izvietošanas parametru noskaņošanu – divdimensiju grafa modeļa planaritātes ieviešanu, ortogonalizāciju un izvietošanas optimizāciju. Līdzīgā principa izmantošana ir iespējama arī trīsdimensiju telpā, attiecīgi [12] prezentētai informācijai – atbilstošs tipveida izvietošanas rezultāts ir redzams 2.2. att.



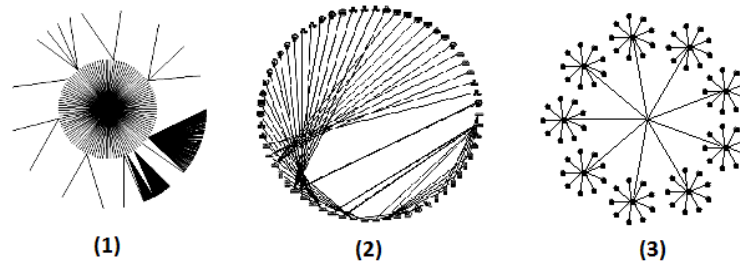
2.2. att. Ortogonālais izvietošanas rezultāts trīsdimensiju telpā

- Hierarhiskais izvietojums, kurš ir piemērots koku vizualizācijai, bija piedāvāts ar [18] autoriem, paredzot piekārtot virsotnes horizontālu līmeņu kopai, meklējot piemēroto telpisko konfigurāciju no tādu aspektu viedokļiem kā minimālie līmeņu skaits, platums un šķautņu krustošanas skaits, vienmērīgā virsotņu sadalīšana starp līmeņiem un garu šķautņu skaita reducēšana. Šīs pieejas vispārināšana līdz trīsdimensiju telpai ir izklāstīta [7], ļaujot konstruēt tipveida izvietojumu, kurš ir parādīts 2.3. att.



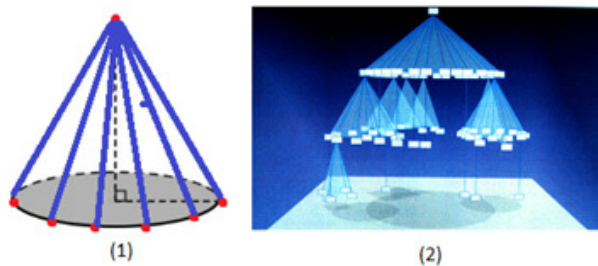
2.3. att. Divdimensiju (1) un trīsdimensiju (2) hierarhiskā grafa modeļa izvietošana

- Radiālais izvietojums [3], atšķirībā no hierarhiskā izvietojuma, kur katrs līmenis tiek reprezentēts ar taisnu līniju, paredz pārveidot līmeņa koncepciju ģeometriskajā riņķa līnijā, attiecīgi 2.4. att. parādītiem izvietojumu variantiem.



2.4. att. Radiālā izvietojuma tipi

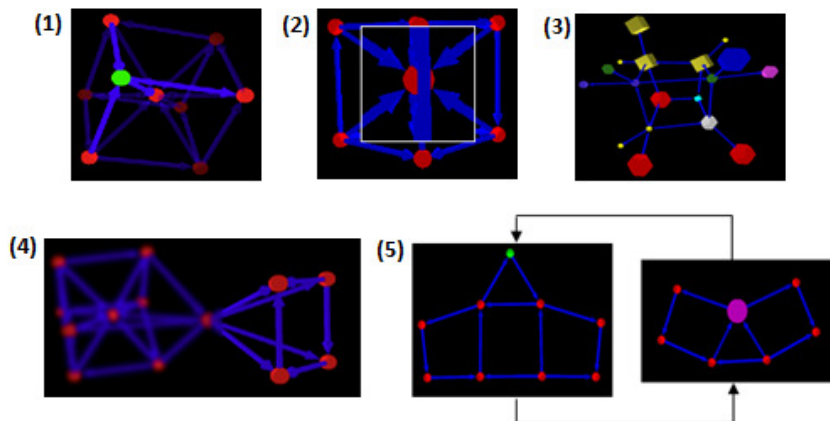
Zinātnieki piedāvā vizualizēt trīsdimensiju hierarhijas [15], novietojot grafa sakni konusa virsotnē, savukārt to pēctečus ir paredzēts vienmērīgi izvietot konusa pamatā – sk. 2.5. att.



2.5. att. Modelis hierarhisko struktūru vizualizācijai trīsdimensiju telpā

Trīsdimensiju objektu vizualizācija ir sarežģīts process, kurš paredz vairāku secīgu transformāciju soļu izpildi grafiskā konveijera ietvaros. Mūsdienīgas vizualizācijas sistēmas, piemēram, *Direct3D* un *OpenGL*, ļauj sekmīgi veikt šo procesu, vienlaicīgi izmantojot

vairākas vizualizācijas tehnikas, kuras koncentrējas uz grafa datu potenciāli svarīgu īpašību izcelšanu (nemainot oriģinālo grafa topoloģiju). Šajā nodaļā tiek aprakstīta papildu vizualizācijas tehniku kopa, sniedzot to implementācijas īpatnību izklāstu, pseidokodu, prasības grafiskajam ietvaram, kā arī to derīguma novērtējumu dažādu uzdevumu izpildīšanai (sk. 2.6. att. 1. daļu – caurspīdīguma ieviešanai, 2. daļu – palielināšanai, 3. daļu – vairāku atribūtu telpai, 4. daļu – aizmiglošanai / kontrasta palielināšanai, 5. daļu – klasterizācijai).



2.6. att. Grafu vizualizācijas papildu tehnikas

Algoritmu un vizualizācijas tehniku apkopojums un klasifikācija ir sniegti nodaļas nobeigumā – attiecīgi 2.1. tabulas saturam.

2.1. tabula. Izvietošanas algoritmu un vizualizācijas tehniku salīdzinošā analīze

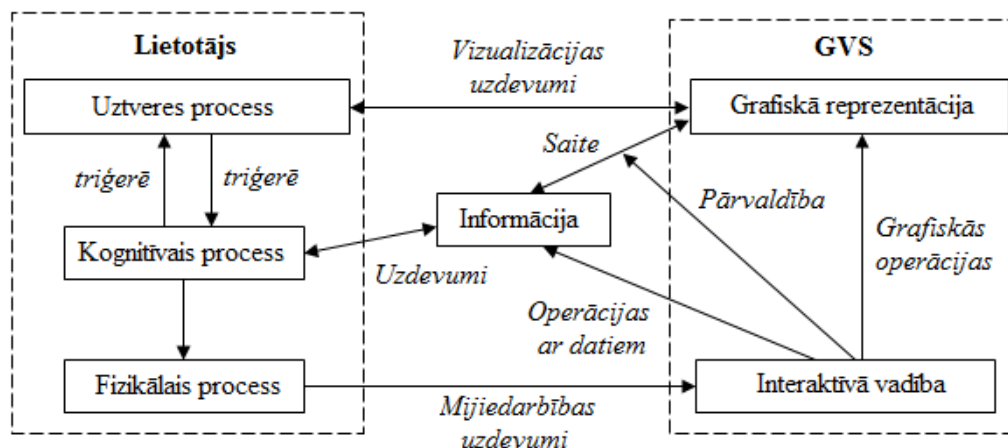
<i>Izvietošanas algoritmu salīdzinājums</i>				
Algoritmu klase	Priekšrocības	Trūkumi	Konkrētu algoritmu sarežģītība	
Uz spēku iedarbību pamatots izvietojums	Ļauj atrast kompaktu izvietojumu; ļauj vizualizēt grafus ar cikliem un ir piemērots jebkura vispārīgā grafa vizualizācijai.	Paredz vairākas iterācijas; algoritma veikspēja nav stabila un gala rezultāta atrašanas laiku ir grūti paredzēt.	Pitera Eidesa atsperu modelis	$\Theta(V ^2 + E)$
			Kamada un Kawai algoritms	$\Theta(V ^2 \log V + E V)$ līdz $\Theta(V ^3)$
			Davidson-Harrel pieeja	$\Theta(V ^2 E)$
			Fruchterman-Reingold pieeja	$\Theta(V + E)$
			GEM algoritms	$\Theta(V ^3)$
			Magnētisko atsperu pieeja	$\Theta(V ^2 + E)$
Ortogonalais izvietojums	Mazs šķautņu krustojumu skaits starp modeļa līmeņiem; gala rezultāts ir paredzams; ļauj vizualizēt grafus ar cikliem.	Potenciāli liels šķautņu krustojumu skaits vienu un to pašu modeļa līmeņu ietvaros.	“Topology-Shape-Metrics” pieeja	$\Theta((V + c) \min(V, m' + 1));$ $\Theta(V ^2); \Theta(V ^2)$
			Trīsdimensiju ortogonalais izvietojums	$\Theta(V)$

Hierarhiskais izvietojums	Koka saknes un lapu automātiskā vizuālā izcelšana; viegli paredzams rezultāts un vienkārša implementācija.	Liels starp-līmeņu šķautņu krustojumu skaits gadījumā, ja grafā ir cikli.	Sugiyama pieeja	$\Theta(V)$ līdz $\Theta(V ^2)$ $\Theta(L)$ līdz $\Theta(L ^2)$
			Trīsdimensiju hierarhiskais izvietojums	$\Theta(V)$ līdz $\Theta(V ^2)$ $\Theta(V)$ $\Theta(L)$ līdz $\Theta(L ^2)$
Radiālais izvietojums	Koka saknes un lapu automātiskā vizuālā izcelšana; nav šķautņu krustojumu koku vizualizācijas gadījumā.	Liels starp-līmeņu šķautņu krustojumu skaits gadījumā, ja grafā ir cikli.	Radiālais izvietojums	$\Theta(V)$
			Cirkulārais izvietojums	$\Theta((V + E) \log(V))$
			Burbuļu izvietojums	$\Theta(V)$
			“Cone tree”	$\Theta(V)$
Vizualizācijas tehniku salīdzinājums				
Vizualizācijas tehnikas nosaukums	Vēlamais efekts	Prasības grafiskām ietvaram	Savietojami grafu izvietojšanas algoritmi	Potenciālās pielietojšanas jomas
Caurspīdīgums	Fokusēšanās uz pētāmiem datiem; sekundārās informācijas ietekmes samazināšana.	Atsevišķu pikseļu krāsu lasīšana no krāsu bufera.	Uz spēku iedarbību pamatots; hierarhiskais; ortogonālais; radiālais.	Programmatūras prasību analīze; reālās pasaules objektu sekošana / pārvaldība; datu izgūšana no tīmekļa; programmatūras moduļu izsaukumu grafī.
Palielināšana	Fokusēšanās uz pētāmiem datiem.	Matricu manipulācijas; dziļuma buferis.	Uz spēku iedarbību pamatots; hierarhiskais; ortogonālais; radiālais.	Vispārīgā datu analīze.
Vairāku atribūtu telpa	Vairāku datu atribūtu reprezentēšana ierobežotajās telpas dimensijās.	Iespēja uzstādīt izmēru / krāsu / caurspīdīgumu / ielādēt patvaļīgas ģeometriskās figūras; dziļuma buferis.	Uz spēku iedarbību pamatots; hierarhiskais; ortogonālais; radiālais.	Programmatūras prasību analīze; reālās pasaules objektu sekošana / pārvaldība; informācijas ar vairākām dimensijām reprezentācija.
Vizuālā klasterizācija	Līdzīgo datu objektu atrašana un to uztveršana vienotā veseluma veidā.	Piekluve virsotņu izvēle, lietojot norādes identifikatorus; dziļuma buferis.	Uz spēku iedarbību pamatots; hierarhiskais.	Programmatūras prasību analīze; datu izgūšana no tīmekļa; mākslīgais intelekts; sociālo tīklu analīze; bioinformātika, utt.
Datu aizmiglošana / kontrasta palielināšana	Fokusēšanās uz pētāmiem datiem; sekundārās informācijas ietekmes samazināšana.	Piekluve ēnotājiem; dziļuma buferis.	Uz spēku iedarbību pamatots; hierarhiskais; ortogonālais; radiālais.	Vispārīgā datu analīze.

2.2. Grafu vizualizācijas izmantošana lietotāja uzdevumu risināšanai

Otrā darba nodaļa sniedz tādu lietošanas gadījumu aprakstu, kuru ietvaros grafu vizualizācija ir pamatota un sniedz lietotājam lietderīgus rezultātus konkrētajos problēmu domēnos, piemēram – modeļu vadāmā arhitektūra, mākslīgais intelekts, programmatūras vizualizācijas sistēmas, realitāšu saišu diagrammu atspoguļošana utt.

Šajā nodaļā ir arī aprakstīts grafu vizualizācijas process no sadarbības starp lietotāju un GVS redzes viedokļa – sk. 2.7. att.

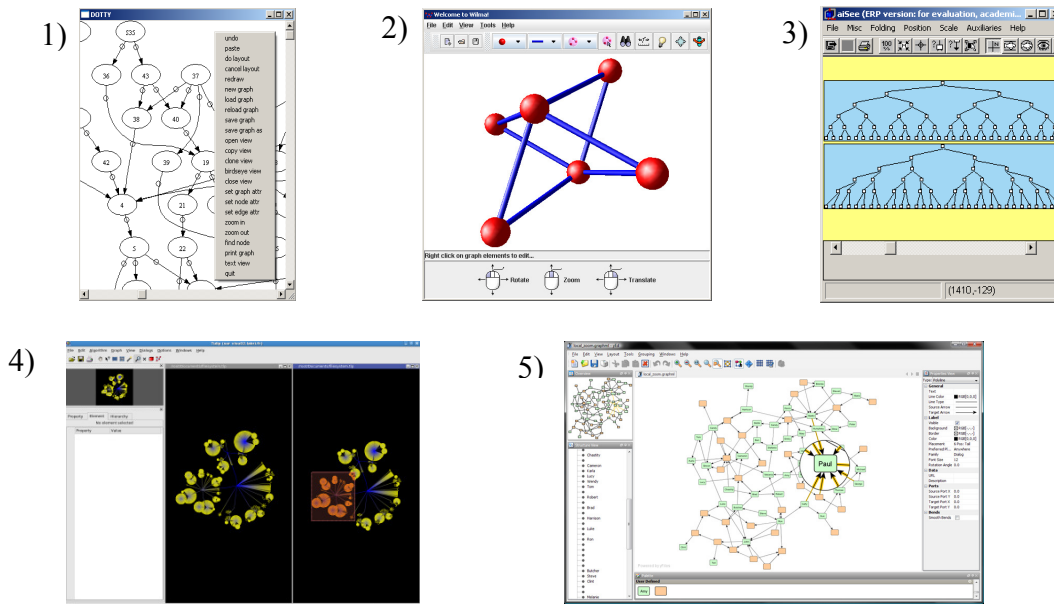


2.7. att. Mijiedarbības modelis starp lietotāju un GVS

Zināšanas par lietotāja īpašībām, informāciju un nepieciešamiem informācijas pārvaldības uzdevumiem ļauj izveidot secinājumus par to, kādi interaktīvās vizualizācijas tipi var būt pielietoti informācijas apstrādes nolūkiem. Visi šie faktori ir svarīgi konkrētu GVS projektēšanas un implementēšanas procesu ietvaros.

Šī nodaļa sniedz vizualizācijas kvalitātes vispārīgo metriku aprakstu, kuras ļauj spriest par to, vai konkrētā izvietojuma algoritma darbības rezultāts ir labāks par kādu citu grafu vizualizācijas rezultātu. Saskaņā ar [1], [14], [15], dažas no svarīgākām metrikām ir sekojošas: grafu elementu savstarpējās krustošanas samazināšana, izmantotās telpas tilpuma samazināšana, šķautņu izliekumu skaita samazināšana, topoloģiski tuvu elementu ģeometriskās distances saglabāšana, šķautņu kopējā garuma samazināšana, virsotņu vienmērīgā sadalīšana vizualizācijas telpā, virsotņu ar lielākām pakāpēm pozicionēšana scēnas centrālajā daļā, pēcteču simetrijas saglabāšana attiecībā uz priekštečiem hierarhiju ietvaros, minimālo no virsotnes izejošo šķautņu leņķu palielināšana, orientēto šķautņu vienotā virziena saglabāšana, utt.

Šīs nodaļas pēdējā daļa ir veltīta eksistējošo grafu vizualizācijas risinājumu, piemēram – *Graphviz*, *Wilmascope 3D*, *aiSee*, *Tulip*, utt. raksturīgo īpašību apkopošanai – sk. 2.8. att.



2.8. att. Eksistējošo GVS ekrānu piemēri

2.3. Vizualizācijas metožu izstrāde

Trešā nodaļa apraksta izvietojšanas algoritmu, vizualizācijas tehniku un vizuālās analīzes papildu režīmu uzlabošanas, kuras piedāvāja darba autors.

Iepriekšminēti algoritmi veiksmīgi veic vizualizāciju gadījumos, kad attēlojamā grafa struktūra ir savietojama ar konkrēto izvēlēto algoritma klasi (piemēram, gadījumā, kad uz hierarhisko izvietojumu pamatotais algoritms vizualizē grafu ar kokveida struktūru, kurš nesatur ciklus). Pretējā gadījumā, vizualizētā rezultāta kvalitāte (krustojošo šķautņu skaita, aizņemtā tilpuma, simetrisko struktūru izcelšanas, utt. ziņā) un tās pārvaldības kvalitāte ir ar vidējo vai zemu kvalitāti.

Piedāvātais risinājums ir hibrīdā algoritma koncepcija, kura paredz efektīvu informācijas vizualizāciju neatkarīgi no grafa topoloģijas īpatnībām. Uz spēku iedarbību pamatota un uz ortogonalitāti pamatota algoritmu kombinācija (daļējais hibrīdais algoritms) ir piedāvātā ar darba autoru kā pirmais solis pilna hibrīdā algoritma veidošanai. Pirmais no tiem ļauj vizualizēt grafu bez maksimālās virsotņu pakāpes ierobežojumiem, kā arī automātiski izcelt simetriskās struktūras, savukārt tā veiktspēja ir grūti prognozējama dēļ algoritma iteratīvā rakstura. No citas puses, uz ortogonalitāti pamatota algoritma darbība ir prognozējama (ņemot vērā tā izpildi secīgu soļu ietvaros), bet maksimālā virsotņu pakāpe šajā gadījumā ir vienāda ar 6.

Daļējā hibrīdā algoritma izstrāde pamatojas uz primārā un sekundārā algoritmu koncepcijām. Veicot abu integrējamo algoritmu novērtēšanu, ir iespējams izdarīt secinājumu, ka ortogonālais izvietojums pieļauj šķautņu izliekumus, kas var pasliktināt uztveri. Ņemot vērā šo faktu, uz spēku iedarbību pamatotais algoritms tika izvēlēts par primāro, vienlaicīgi iestrādājot tajā uz ortogonalitāti pamatotā algoritma raksturīgās īpašības. Piedāvātā algoritma pseidokods ir parādīts 2.9. att.

```

/*1*/ for each vertex k
/*2*/   position(k) = point of orthogonal grid(k);
/*3*/ end

/*4*/ until average kinetic energy ( $\sqrt{dx^2 + dy^2}$ ) <  $\xi$ 
/*5*/   for each vertex i
/*6*/     if average kinetic energy > previous average kinetic energy
/*7*/       for each vertex k
/*8*/         position(k) = random offset from position(k);
/*9*/       end
/*10*/    end
/*11*/    previous average kinetic energy = average kinetic energy;
/*12*/    velocity(i) = velocity(i) * f;
/*13*/    for each vertex j
/*14*/      velocity(i) += velocity to repulse from j;
/*15*/    end
/*16*/    for each vertex j connected to i
/*17*/      velocity(i) += velocity to attract to j;
/*18*/    end
/*19*/    position(i) += velocity(i);
/*20*/  end
/*21*/ end
/*22*/ for each vertex k
/*23*/   position(k) = approximation to orthogonal grid(k);
/*24*/   position(k) = position(k) - (min_poz + max_poz)/2;
/*25*/ end

```

2.9. att. Daļējā hibrīdā algoritma pseidokods

Potenciāli uzlabojumi šajā gadījumā ir šādi:

- sākotnējās virsotņu gadījumu pozīcijas izpaužas nenoteiktajā iterāciju skaitā līdzsvara stāvokļa atrašanai. *Risinājums*: izvietot grafa virsotnes ortogonālā režģa tuvākajos punktos pirms notiek pirmās iterācijas uzsākšana (šī operācija ir analogiska rīkam „piesaistīt režģim” (*snap to grid*), kurš tiek plaši pielietots datu redaktoros ar nolūku samazināt objektu gadījumsakārtojumu);
- ja sistēmas vidējās kinētiskās enerģijas vērtība sasniedz lokālu minimumu, ir nepieciešams papildu laiks lai atkāptos no šī stāvokļa. *Risinājums*: veikt virsotņu pozīciju nelielus lēcienus, lai būtu iespēja izvairīties no lēnās atkāpšanas no lokālā minimuma, kad tas tiek konstatēts;
- sasniedzot līdzsvara stāvokli, virsotņu koordinātes satur daļskaitļu vērtības, kas palielina grafa modeļa izvietošanas nejaušību. *Risinājums*: piespiedu kārtā aproksimēt virsotnes līdz ortogonālā režģa punktiem pēc līdzsvara stāvokļa sasniegšanas;
- līdzsvara stāvoklim atbilstošais modelis tiek formēts ar nenoteiktu atkāpi no koordināšu sistēmas centra. *Risinājums*: izvietot grafa modeli blakus koordināšu sistēmas centram (līdzīgi ortogonālam modelim), pielietojot (2.1) formulu katrai grafa virsotņu dimensijai:

$$coord' = coord - \frac{\min_coord + \max_coord}{2} \quad (2.1)$$

Tika veikta eksperimentu kopa, kura ir aprakstīta darba 4. nodaļā, lai apliecinātu piedāvātās pieejas efektivitāti.

Ir piedāvāta grafu vizualizācijas tehniku kopa, pēc tā paša principā kā darba 1. nodaļā. Attiecīgas tehnikas ir sekojošas:

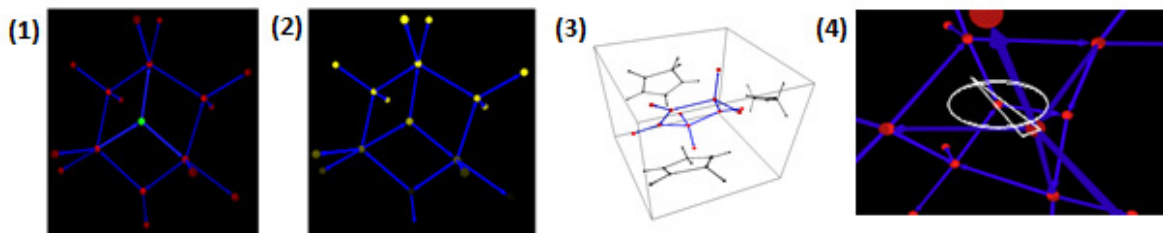
1. Apgaismošanas distance – kalpo fokusēšanai uz noteiktās datu kopas. Pieejas galvenā ideja ir vizuāli „novājināt” grafu elementus (samazinot to krāsu intensitāti),

pakļaujoties noteiktai iepriekšdefinētai funkcijai, kura ņem vērā ģeometrisku distanci starp telpas reģionu, kurš tiek pētīts pašreiz, un jebkuru citu patvaļīgu reģionu. Distances vērtība tiek izmantota kā ieejas parametrs krāsas intensitātes funkcijai, piemēram (2.2) funkcijai, kura tiek definēta atsevišķos parametra intervālos.

$$F(d) = \begin{cases} \frac{1}{d}, d < 10 \\ \frac{1}{10}, 10 \leq d \leq 20 \\ \frac{1}{d^2}, d > 20 \end{cases} \quad (2.2)$$

2. Gradianta trafarets – pielieto gradientu attēlu un trafareta koncepciju. Šī tehnika ir lietderīga gadījumā, ja grafa modeļa izvietojums paredz izvietot virsotnes dažādos telpas līmeņos (piemēram – trīsdimensiju ortogonālais vai hierarhiskais izvietojums). Ņemot vērā, ka atsevišķi līmeņi var būt īpaši svarīgi analīzes kontekstā, pastāv iespēja definēt kopējo gradienta virzienu katrā no šiem gadījumiem (piemēram – „no ekrāna augšējās daļas uz apakšējo daļu” vai „no ekrāna kreisās puses uz labo pusi”), uzģenerēt attiecīgo attēlu un pielietot to grafa elementu krāsu dināmiskai korekcijai.
3. Ēnu projicēšana – paredz trīsdimensiju grafa modeļa attēlošanu iteratīvu soļu ietvaros. Pirmais solis vizualizē modeli no pašreizējā kameras skata punkta, līdzīgi kā visās iepriekšējās minētajās tehnikās. Nākamam soļu ietvaros virtuālā kamera tiek pozicionēta ortogonāli attiecībā uz grafu modeli – precīzi no augšas, no priekšējās malas, no kreisās malas utt. Katrs vizualizācijas rezultāts tiek uzglabāts atsevišķas tekstūras veidā. Kad visi minētie soļi ir pabeigti, iegūtas tekstūras tiek izmantotas trīsdimensiju paralēlskaldņa (vai kuba) skaldņu tekstūrēšanai. Scēnas ietvaros paralēlskaldnis tiek vizualizēts tādā veidā, lai trīsdimensiju grafa modelis būtu izvietots tā centrālajā daļā. Šajā gadījumā katra tekstūra reprezentē oriģinālās topoloģijas projekciju, jeb „ēnu”.
4. Atbalsta navigācija – gadījumā, ja analizējamās informācijas apjoms ir pārāk liels, lietotājam ir jānodrošina informatīvais rīks, kas ļautu viņam orientēties datos. Tas, savukārt, prasa „virtuālā kompasa” analoga implementāciju. Šī tehnika paredz, ka kompass vienmēr norāda iepriekšdefinētajā virzienā, kas ļauj nodrošināt ātrās navigācijas iespējas neatkarīgi no virtuālās kameras esošās pozīcijas. Atbalsta navigācija var tikt pielietota arī analīzes vajadzībām, piemēram, „kompass” var vienmēr norādīt uz virsotnes priekštecī, ļaujot uzlabot navigācijas iespēju hierarhisko datu ietvaros.

Attiecīgi vizualizācijas rezultāti ir prezentēti 2.10. att. (1. daļa – apgaismošanas distance, 2. daļa – gradienta trafarets, 3. daļa – ēnu projicēšana, 4. daļa – atbalsta navigācija).



2.10. att. Uzlabotās vizualizācijas tehnikas grafu attēlošanai

Piedāvāto vizualizācijas tehniku kopsavilkums ir izklāstīts 2.2. tabulā.

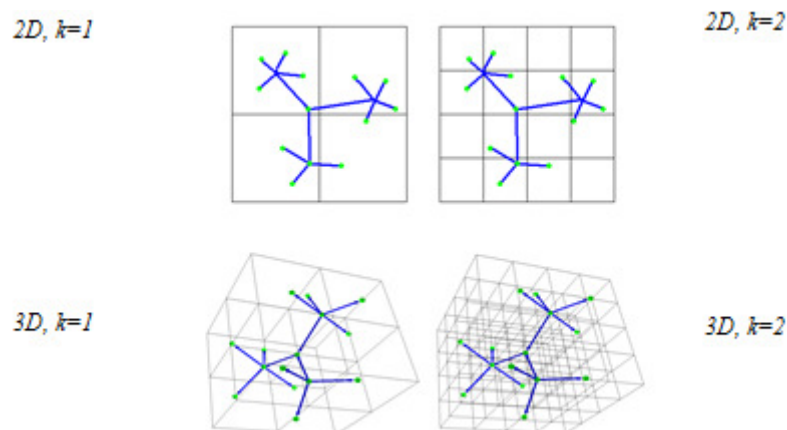
2.2. tabula. Piedāvāto vizualizācijas tehniku apkopojums

Vizualizācijas tehnikas nosaukums	Vēlamais efekts	Prasības grafiskām ietvaram	Savietojami grafu izvietojšanas algoritmi	Potenciālās pielietošanas jomas
Apgaismošanas distance	Fokusēšanās uz pētāmiem datiem; sekundāro datu ietekmes noskaņošana.	Iespēja ietekmēt vizualizējamā objekta krāsas; dziļuma buferis.	Uz spēku iedarbību pamatots; hierarhiskais; ortogonālais; radiālais.	Programmatūras prasību analīze; reālās pasaules objektu sekošana / pārvaldība.
Gradianta trafarets	Fokusēšanās uz pētāmiem datiem; nebūtiskās informācijas slēpšana.	Piekluve trafareta buferim.	Hierarhiskais; ortogonālais; radiālais.	Dati ar izteikto hierarhisko struktūru.
Ēnu projicēšana	Datu sarežģītības novērtēšana; labākās konfigurācijas noteikšana plakanaī grafa vizualizācijai.	Piekluve rasterizācijai tekstūrā; dziļuma buferis.	Uz spēku iedarbību pamatots; hierarhiskais.	Programmatūras prasību analīze; reālās pasaules objektu sekošana / pārvaldība; uzdevumi, kur rezultātam ir jābūt izvadītam plāknē.
Atbalsta navigācija	Lokālās / globālās vīzijas uzturēšana, veicot navigāciju datu ietvaros.	Iespēja ielādēt navigācijas rīka attēlu no faila / veikt tā konstruēšanu no pieejamiem primitīviem.	Uz spēku iedarbību pamatots; hierarhiskais; ortogonālais.	Reālās pasaules objektu sekošana / pārvaldība; navigāciju hierarhiju ietvaros.

Pēdējā 3. nodaļas daļā tiek piedāvāti papildu trīsdimensiju attēlošanas režīmi paplašinātai datu analīzei – uz spēku iedarbību pamatotai klasterizācijai, sākotnējai vizuālajai analīzei, kā arī uz magnētisko spēku iedarbību pamotai mijiedarbībai ar vizualizējamo grafu modeli.

Objektu klasterizācija ir nepieciešama, ja informācijas vienības ir jānovērtē no to līdzības vai semantiskā tuvuma redzes viedokļiem [9]. Šāda analīze var būt veikta, piemēram, datubāzes ietvaros, ar nolūku optimizēt informācijas glabāšanu atmiņā, vai arī atklāt likumsakarības, kuras nav acīmredzamas lielajos vāji strukturētos datu apjomos.

Darba ietvaros uz spēku iedarbību pamatotā grafu izvietojuma pielietošana tiek uzskatīta par pirmo soli relāciju datu klasterizācijas nolūkiem. Tā ir papildināta ar atbilstošu telpas sadalīšanas stratēģiju, lai būtu iespēja izveidot pilnvērtīgu klasterizācijas algoritmu [24]. Uz spēku iedarbību pamatotās izvietojšanas sekundārais efekts ir saistīts ar to, ka rezultējošais izvietojums paredz stipri saistītu virsotņu tuvu grupēšanu, vienlaicīgi atdalot vāji saistītus objektus dažādos telpas reģionos. Šī ir derīga īpašība, kura lielā mērā korelē ar klasterizācijas būtību. Tās papildināšanas ar telpas rekursīvās sadalīšanas papildu mehānismu ļauj identificēt reģionus, kuri satur unikālus datu elementus – sk. 2.11. att.



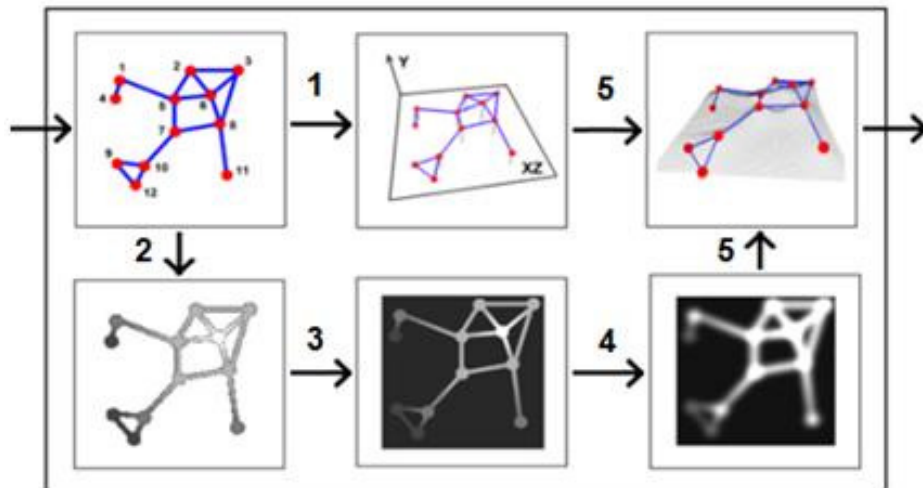
2.11. att. Rekursīvā divdimensiju un trīsdimensiju telpu sadalīšana

Sākotnējā vizuālā analīze ļauj lietotājam identificēt pētāmās telpiskās problēmas vispārējus raksturojumus un pamataspektus. Par piemēru tam var kļūt esošā tīkla infrastruktūras paplašināšanas plānošana, pievienojot tai jaunus elementus (stacijas, centrmezgls, noliktavas utt.). Šajā sākotnējās analīzes posmā detalizēti tīkla aspekti nav svarīgi, jo galvenais uzsvars tiek likts uz tādiem primāriem aspektiem kā tīkla topoloģija, to elementu ģeogrāfiskās (vispārinot – ģeometriskās) pozīcijas un uz tām attiecināmās skaitliskās vērtības (caurlaidspēja / peļņa / pasažieru vai transakciju skaits utt.) [22].

Izskatīsim sekojošo vispārīgo uzdevumu: zinot diskrētu tīkla mezglu telpiskās pozīcijas, attiecības starp tiem un katra mezgla un / vai attiecības vispārīgo īpašību, atrast attiecīgu kvantitatīvu raksturojumu jaunam tīkla elementam ar vēlamu pozīciju. Parasti tas tiek darīts, pielietojot vidējās vērtības atrašanu / interpolāciju / ekstrapolāciju tām vērtībām, kuras ir asociētas ar tuvajiem eksistējošiem tīkla elementiem. Piedāvātā attiecīgās vērtības meklēšanas koncepcija paredz 5 vispārīgo soļu izpildi [25]:

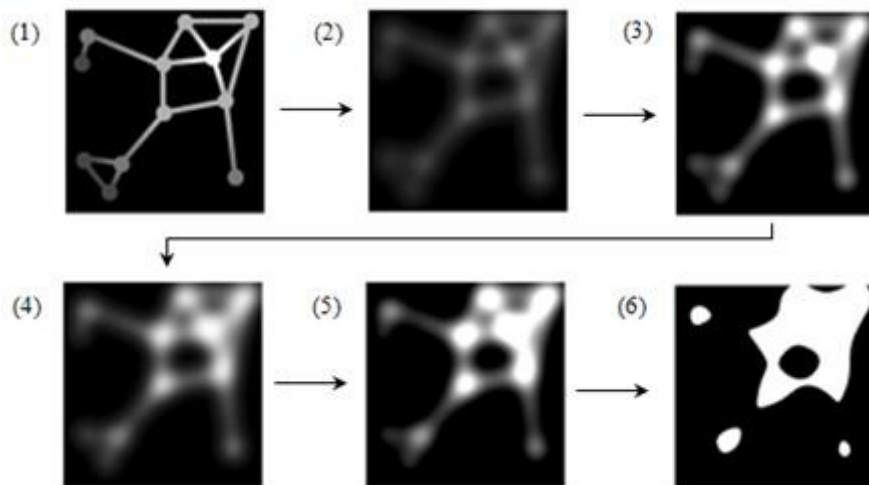
1. Tīkla grafa vizualizāciju trīsdimensiju Dekarta koordināšu sistēmā, lietojot divas dimensijas elementu telpiskās pozīcijas projicēšanai, savukārt trešo dimensiju – ar grafu elementiem saistīto kvantitatīvo vērtību projicēšanai.
2. Telpiskā grafa attēlošana pelēkas krāsas gradācijās, ņemot vērā elementu „svarus”.
3. Pelēkas krāsas gradāciju attēla transformēšana augstumu kartē.
4. Rezultējošās augstumu kartes nogludināšana ar divdimensiju attēlu filtriem.
5. 1. un 4. soļu kombinācija vizuālās analīzes nolūkos.

Vispārīgā datu apstrādes soļu shēma ir parādīta 2.12. att.



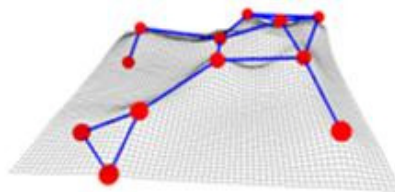
2.12. att. Datu apstrādes secība

Pirmā soļa ietvaros grafa ķermenis ir sagatavots vizualizācijai trīsdimensiju telpā tādā veidā, lai topoloģijas projicēšana notiktu XZ telpā, savukārt kvantitatīvie dati ir asociēti ar Y asi. Otrais solis paredz sākotnējā grāfa konvertāciju pelēkas krāsas gradāciju attēlā, kurš kļūst par augstuma kartes bāzi. Trešajā solī tiek veidota pilnvērtīgā augstumu karte, aizpildot atlikušo attēla laukumu ar melno krāsu. Ceturtajā solī tā tiek apstrādāta ar Gausa funkcijas aizmiglojumu, kā arī kontrasta un spilgtuma korekcijām, ar nolūku iegūt gludu un vienmērīgi interpolētu sadalījumu – sk. 2.13. att.



2.13. att. Apstrādes transformāciju ķēde

Piektā un pēdējā soļa ietvaros funkcijas virsma tiek vizualizēta kopā ar grafa ķermeņi trīsdimensiju telpā, kas ļauj iegūt kopējo ieskatu situācijā, kā tas ir parādīts 2.14. att.



2.14. att. Kombinētā grafa ķermeņa un funkcijas virsmas vizualizācija

Uz krāsu un magnētisko lauku mijiedarbības pamatotais grafu vizualizācijas modelis tiek balstīts uz spēku mijiedarbību pieejas variācijas [23]. Šis modelis ir papildināts ar pārvaldības stratēģiju, kura pamatojas uz krāsu kodēšanu un atbalsta dināmisko mijiedarbību starp lietotāju un grafu kognitīvajā līmenī. Tiek ieviesta magnētiskā lauka ģenerators koncepcija, kurš sadarbojas ar dažādu krāsu grafa elementiem saskaņā ar likumu kopu, kura ir definēta uz RGB (*red-green-blue*) krāsu modeļa bāzes.

Uz spēku iedarbību pamatota izvietojuma īpašību izpēte apstiprināja to lietderību grafa vizuālajai analīzei, kura pamatojas uz dināmisko mijiedarbību starp lietotāju un GVS. Saskaņā ar piedāvāto pieeju, fiksētais iterāciju skaits (vai algoritma darbības nosacītā pārtraukšana) tiek atcelts, atstājot grafa modeli pastāvīgā „gatavības” stāvoklī, pat tajos gadījumos, kad līdzsvars ir sasniegts. Šāds pusaktīvais stāvoklis ļauj reaģēt uz papildu spēku ģeneratoriem, kuri tiek pozicionēti un pārvaldīti ar lietotāju virtuālajā trīsdimensiju telpā.

Par šāda tipa mijiedarbības piemēru var kļūt spēka ģenerators novietošana izvēlētajā telpas reģionā, lai „pievilktu” tajā virsotnes, kuras atbilst ar lietotāju definētajiem kritērijiem (piemēram – tikai mantotās klases *UML* modeļu ietvaros; tikai tie failu sistēmas direktorijs, kuri nav tukši, utt.), lai būtu iespēja koncentrēties uz to izpēti. Cits iespējamais scenārijs ir spēka ģenerators izvietojumu blakus (vai iekš) grafa modelim, lai atgrūstu tās virsotnes, kurām jābūt filtrētām no izpēti.

Ņemot vērā, ka mijiedarbības loģikai starp spēku ģeneratoriem un grafu elementiem ir jābūt pietiekami sarežģītai, lai veiktu saliktas un selektīvas manipulācijas ar datiem, bet tajā pat laikā tai ir jābūt arī intuitīvi saprotamai, tika izstrādāta likumu kopa uz krāsu pamatoti kognitīvai mijiedarbībai.













Darba autors piedāvā divas vispārīgās stratēģijas, katrai no kurām ir divi apakštipi. Rezultātā veidojas sekojoša metožu kopa – „Uz RGB krāsu modeli pamatota saistība”, „Uz RGB krāsu modeli pamatots pretstats”, „Uz nokrāsu modeli pamatota saistība”, „Uz nokrāsu modeli pamatots pretstats”.

„RGB krāsu modeļa distance” ir vispārīgā stratēģija, kura analizē „attālumu” D_{RGB} starp grafu elementu E un spēka ģeneratoru M RGB kuba telpā. Formāli, šī metrika tiek definēta saskaņā ar formulu (2.3).

$$D_{RGB} = \frac{\sqrt{(R_M - R_E)^2 + (G_M - G_E)^2 + (B_M - B_E)^2}}{\sqrt{3}} \quad (2.3)$$

Tika izveidota paraugu 2.3. tabula, kura specifiski D_{RGB} vērtību matricu primāru un dažu sekundāru krāsu kombinācijām.

2.3. tabula. D_{RGB} vērtību kopa paraugu krāsu pāriem

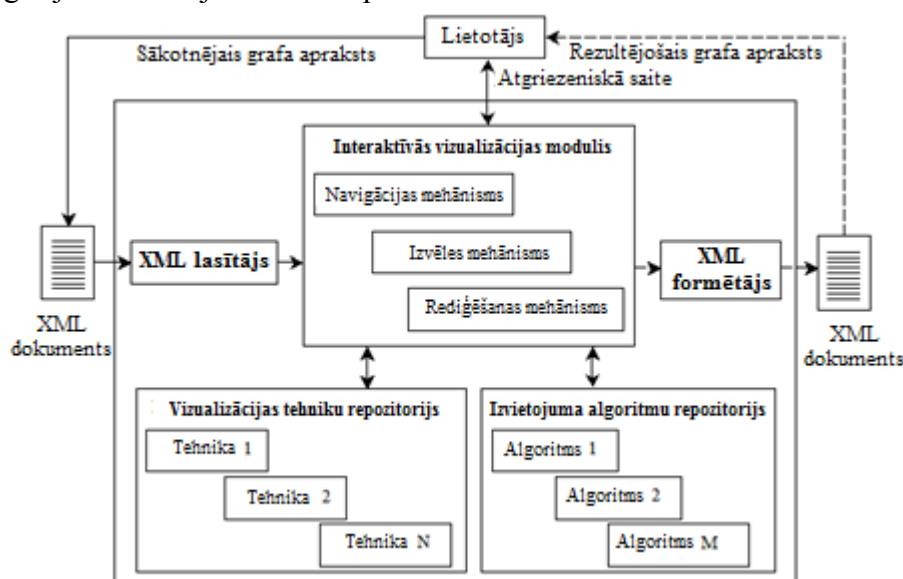
$(R_E, G_E, B_E) / (R_M, G_M, B_M)$	(0.89, 0.51, 0.26)	(0.29, 0.39, 0.85)	(0.18, 0.98, 0.60)	(0.69, 0.20, 0.96)	(0.44, 0.32, 0.20)	(0.13, 0.69, 0.30)	(1.00, 1.00, 0.00)	(0.50, 0.50, 0.50)
								
(0,0,0) 	0,61	0,57	0,67	0,69	0,34	0,44	0,82	0,5
(0,0,1) 	0,73	0,3	0,62	0,42	0,56	0,58	1	0,5
(0,1,0) 	0,6	0,63	0,36	0,83	0,48	0,26	0,58	0,5
(0,1,1) 	0,73	0,4	0,25	0,61	0,65	0,35	0,82	0,5

(1,0,0) ■	0,34	0,68	0,82	0,59	0,39	0,66	0,58	0,5
(1,0,1) ■	0,52	0,47	0,87	0,21	0,59	0,76	0,82	0,5
(1,1,0) ■	0,32	0,73	0,59	0,74	0,52	0,56	0	0,5
(1,1,1) 	0,52	0,54	0,53	0,5	0,68	0,67	0,58	0,5

Ir iespējamas divas šīs pieejas modifikācijas. „Saištības” versija paredz, ka stiprākais magnētiskais pievilksanas / atgrūšanas spēks eksistē starp vienādu vai līdzīgu krāsu grafu elementiem / spēku ģeneratoriem. Tajā pat laikā, „pretstata” versija pamatojas uz pretējās loģikas un pastiprina sadarbību starp dažādu (tajā skaitā pretēju) krāsu objektiem. Algoritmā attiecīgās atšķirības tiek kontrolētas ar F_m mainīgo, kurš ir vienāds ar $(1-D_{RGB})$ „saištības” versijas gadījumā un ar D_{RGB} „pretstata” versijas gadījumā.

„Uz nokrāsu” pamatota stratēģija ir līdzīga uz RGB krāsu modeli pamatotai, taču tā analizē nokrāsu atšķirības starp mijiedarbībā esošajiem elementiem.

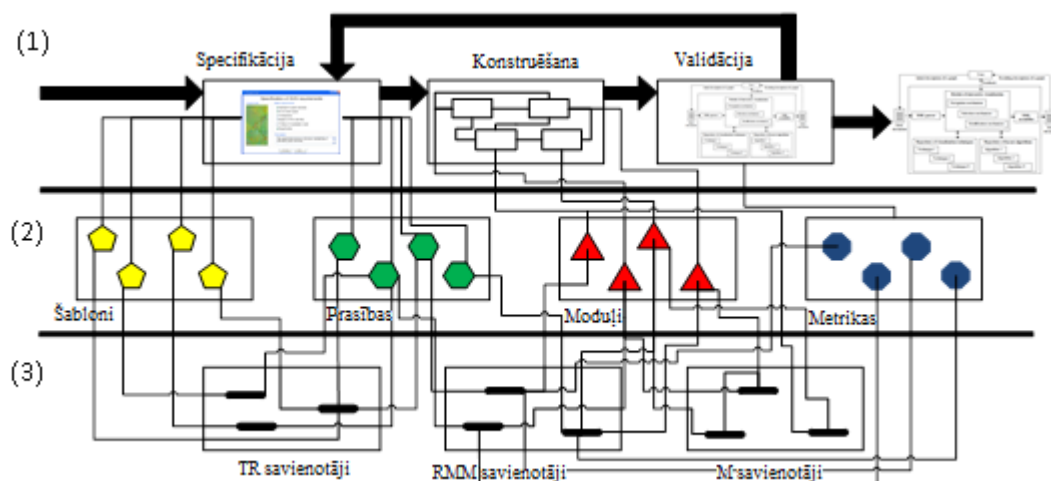
Lai integrētu minētus uzlabojumus, promocijas darba ietvaros tika izveidota programmatūras sistēma “3DIIVE” (*Three-Dimensional Interactive Information Visualization Environment*) [28], kas sastāv no vairākiem moduļiem. Attiecīgās arhitektūras shematiskais apraksts augstajā abstrakcijas līmenī ir parādīts 2.15. att.



2.15. att. Grafu attēlošanas programmatūras sistēmas arhitektūra

Šīs sistēmas galvenās sadaļas ir sekojošas: *XML lasītājs*, *interaktīvās vizualizācijas modulis*, *vizualizācijas tehniku repozitorijs*, *izvietojuma algoritmu repozitorijs* un *XML formētājs*.

Šāda modulārā arhitektūra ļauj piedāvāt automatizētās GVS konstruēšanas iespējas. Atbilstoša ietvara specifikācija tiek izstrādāta šī darba ietvaros [26]. Tā paredz formāli definētu saišu ieviešanu starp komponentēm, kā arī dinamiskās konfigurācijas un validācijas iespējas, kurām ir jābūt pietiekamām GVS automatizētai izveidošanai. Ietvara modelim ir trīs līmeņu arhitektūra, kuras ietvaros 1. līmeņa elementi atbilst GVS veidošanas procesiem, savukārt 2. un 3. līmeņi nodrošina iekšējus implementācijas mehānismus – sk. 2.16. att.



2.16. att. Vispārējā ietvara arhitektūra GVS automatizētai konstruēšanai

Augšējais līmenis kalpo gan kā sākotnējo prasību specifikācijas ieejas punkts, gan kā rezultējošā GVS izeja. Tas sastāv no trim stadijām – „Specifikācija”, „Konstruēšana” un „Validācija”, kuras atbilst klasiskajam modelim „prasības – kods – testēšana”. Šis līmenis nodrošina arī atgriezenisko saiti, kura pieļauj iteratīvo GVS veidošanu, ņemot vērā lietotāja novērtējumus pēc sākotnējās iepazīšanās ar izveidoto GVS.

Nākamais līmenis ietver sevī atsevišķu komponentu kopu, kuras ir GVS svarīgas sastāvdaļas, jeb „artefakti” (artefakts ir jebkurš ar GVS saistīts objekts, kurš ir unikāls un atpazīstams). Piedāvātajā ietvarā eksistē četri artefaktu tipi – „Šablons”, „Prasība”, „Modulis” un „Metrika”. Katrai artefaktu tipu kopai ir jābūt implementētai atsevišķā repozitorija veidā, ar iespēju pārvaldīt (piemēram – pievienot, rediģēt, dzēst, sniegt aprakstu) uzturamus artefaktus, kā arī definēt attiecības ar citām kopām, izmantojot „savienotājus”.

Trešais līmenis implementē ietvara kodola loģiku un pārvalda minētus savienotājus, kuri ļauj konfigurēt artefaktu savstarpējās attiecības, pamatojoties uz formālu mehānismu, kurš atbalsta šāda veida saites starp ietvara sastāvdaļām.

2.4. Piedāvāto uzlabojumu pielietošana

Lai apliecinātu piedāvāto vizualizācijas uzlabojumu rezultātus, tika veikta eksperimentu kopa ar 3DIIVE GVS.

2.4.1. Eksperimenti ar Kriminālprocesu informācijas sistēmas prototipa datiem

Eksperimenti tika veikti ar Kriminālprocesu informācijas sistēmas prototipu, kurš reprezentē Latvijas Republikas Iekšlietu Ministrijas integrēto risinājumu datu ievadei, apstrādei un uzglabāšanai attiecībā uz visiem aktīviem Latvijas Republikas kriminālprocesiem.

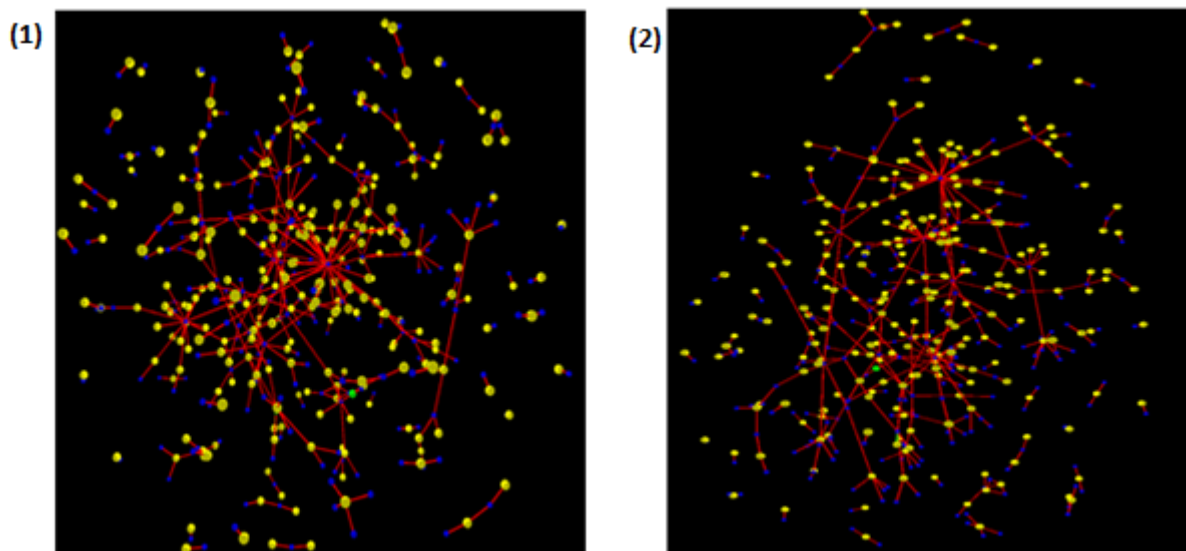
Tika veikts sekojošais vizuālās analīzes scenārijs – divu datu kopu vizualizācija, pirmā no kurām reprezentē datus par kriminālprocesiem (apzīmēti ar atbilstošiem kriminālprocesu numuriem), savukārt otrā – datus par personām (apzīmētas ar abstraktiem unikāliem identifikatoriem). Attiecīgi objekti tiek vizualizēti kā grafa virsotnes, bet identificētas attiecības starp personām un kriminālprocesiem tiek aizstātas ar šķautnēm.

Lai novērtētu piedāvātā daļējā hibrīdā algoritma veiktspēju, no sistēmas datubāzes tika izgūtas trīs datu kopas:

- 1) Testa prototipa ietvaros reģistrētā informācija laika posmā no 01.03.2012 – 31.05.2012 (21 kriminālprocess, 34 personas).
- 2) Testa prototipa ietvaros reģistrētā informācija laika posmā no 01.01.2012 – 31.05.2012 (45 kriminālprocesi, 63 personas).
- 3) Testa prototipa ietvaros reģistrētā informācija laika posmā no 01.01.2011 – 31.05.2012 (259 kriminālprocess, 236 personas).

Visos vizualizācijas eksperimentos kriminālprocesus reprezentējošās virsotnes tika iekrāsotas dzeltenā krāsā, personu reprezentējošās virsotnes tika iekrāsotas zilā krāsā, savukārt šķautnes tika iekrāsotas sarkanā krāsā.

Vizualizācija notika lietojot oriģinālo uz spēku iedarbību pamatotu algoritmu, kā arī piedāvāto daļējo hibrīdu algoritmu. Lielākās datu kopas vizuālās apstrādes rezultāts ar abiem algoritmiem (sasniežot līdzsvara stāvokli) ir parādīts 2.17. att. (1. daļa – oriģinālais uz spēku iedarbību pamatots algoritms, 2. daļa – daļējais hibrīdais algoritms).



2.17. att. Trešās datu kopas vizuālais modelis stabilajā līdzsvara stāvoklī

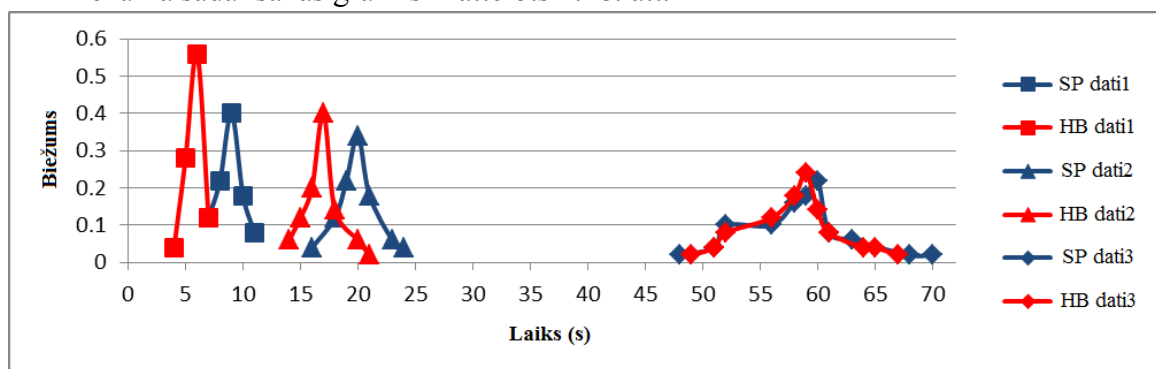
Tika veikta abu algoritmu kvantitatīvā novērtēšana.

2.4. tabula. Algoritmu ātrdarbības kvantitatīvā novērtēšana

Uz spēku iedarbību pamatots algoritms (SP)											
<i>Datu kopa 1</i>											
Laiks (s)	7	8	9	10	11						
Skaits	6	11	20	9	4						
Biežums	0,12	0,22	0,4	0,18	0,08						
<i>Datu kopa 2</i>											
Laiks (s)	16	18	19	20	21	23	24				
Skaits	2	6	11	17	9	3	2				
Biežums	0,04	0,12	0,22	0,34	0,18	0,06	0,04				
<i>Datu kopa 3</i>											
Laiks (s)	48	51	52	56	58	59	60	61	63	68	70
Skaits	1	2	5	5	8	9	11	4	3	1	1
Biežums	0,02	0,04	0,1	0,1	0,16	0,18	0,22	0,08	0,06	0,02	0,02

Daļējais hibrīdais algoritms (HB)											
<i>Datu kopa 1</i>											
Laiks (s)	4	5	6	7							
Skaitis	2	14	28	6							
Biežums	0,04	0,28	0,56	0,12							
<i>Datu kopa 2</i>											
Laiks (s)	14	15	16	17	18	20	21				
Skaitis	3	6	10	20	7	3	1				
Biežums	0,06	0,12	0,2	0,4	0,14	0,06	0,02				
<i>Datu kopa 3</i>											
Laiks (s)	49	51	52	56	58	59	60	61	64	65	67
Skaitis	1	2	4	6	9	12	7	4	2	2	1
Biežums	0,02	0,04	0,08	0,12	0,18	0,24	0,14	0,08	0,04	0,04	0,02

Biežuma sadalīšanas grafiks ir attēlots 2.18. att.

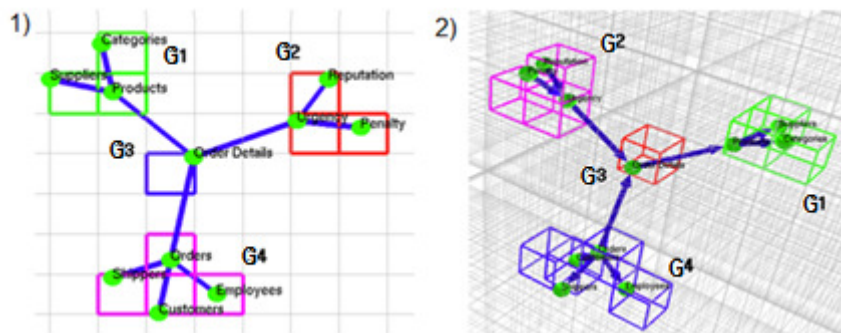


2.18. att. Biežuma sadalījums

Vidējais SP algoritma rezultāts 1. datu kopai ir 9 sekundes, 2. datu kopai ir 20.14 sekundes, 3. datu kopai ir 58.72 sekundes. Vidējais HB algoritma rezultāts 1. datu kopai ir 5.5 sekundes, 2. datu kopai ir 17.28 sekundes, 3. datu kopai ir 58.36 sekundes. Šo vērtību analīze ļauj konstatēt, ka HB ir neapšaubāmi pārkās par SP mazu datu kopu gadījumā $(1 - 5.5/9) \cdot 100 = 39\%$; joprojām labāks vidējo datu kopu gadījumā (kaut gan ar mazāko efektivitāti) $(1 - 17.28/20.14) \cdot 100 = 14\%$ un ir tuvi identisks lielu datu kopu gadījumā $(1 - 58.36/58.72) \cdot 100 = 1\%$.

Pašu datu vizuālā analīze ļāva atklāt dažus tipveida veidojumus, kuri ir sastopami visās datu izlasēs. Pirmais no tiem ir „viens pret vienu” / „viens pret daudziem” tipa attiecības starp kriminālprocesiem un noziedzniekiem. Tas tiek vizualizēts kā atsevišķa dzeltena virsotne, kura ir saistīta ar patvaļīgo zilu virsotņu skaitu. Otrais tips ir „daudzi pret daudziem” tipa attiecības, kurš tiek reprezentēts ar abu krāsu virsotņu savstarpēji saistītiem veidojumiem.

Vēl viens vizualizācijas scenārijs tika veikts Latvijas Republikas Iekšlietu Ministrijas iestāžu hierarhiskās struktūras izpētes ietvaros. Tas demonstrē gradienta trafareta pielietojumu, lai būtu iespēja koncentrēties uz esošā telpas reģiona un apslēpt dziļāko hierarhijas līmeņu detaļas – sk. 2.19. att.



2.21. att. Datu vizuālā klasterizācija

Lai būtu iespēja vizuāli izšķirt klasterus, tika izmantoti biezāki robežu reģioni un dažādas krāsas. Kā ir redzams, veicot klasterizāciju attiecīgi piedāvātajam algoritmam, ir identificētas četru klasteru kopas (grupas): $G1 = \{\text{"Suppliers"}, \text{"Categories"}, \text{"Products"}\}$; $G2 = \{\text{"Reputation"}, \text{"Urgency"}, \text{"Penalty"}\}$, $G3 = \{\text{"Order Details"}\}$ un $G4 = \{\text{"Orders"}, \text{"Employees"}, \text{"Customers"}, \text{"Shippers"}\}$. Tas ir loģiskais iznākums, kurš akcentē semantiskās attiecības starp trim dažādiem domēniem – produktiem, pasūtījumiem un to izpildīšanas steidzamību, kuri tiek saistīti ar ceturto domēnu – produktu pasūtījumiem. Kā jau bija minēts, attiecīgā informācija par datu grupām ir lietderīga gan biznesa datu analīzei, gan to uzglabāšanas optimizācijai.

Kaut gan šis rezultāts ir loģiski ticams, tas nav vienīgi iespējamais. Sākotnējā virsotņu gadījuma izvietošana telpā (pirms līdzsvara stāvokļa meklēšanas), var izveidot bieži sastopamo klasterizācijas variantu kopu, kuri, šajā gadījumā, var būt sekojošas:

1. Iepriekšminētais.
2. $G1 = \{\text{"Suppliers"}, \text{"Categories"}, \text{"Products"}, \text{"Order Details"}\}$; $G2 = \{\text{"Orders"}, \text{"Employees"}, \text{"Customers"}, \text{"Shippers"}\}$; $G3 = \{\text{"Reputation"}, \text{"Urgency"}, \text{"Penalty"}\}$.
3. $G1 = \{\text{"Suppliers"}, \text{"Categories"}, \text{"Products"}\}$; $G2 = \{\text{"Orders"}, \text{"Employees"}, \text{"Customers"}, \text{"Shippers"}, \text{"Order Details"}\}$; $G3 = \{\text{"Reputation"}, \text{"Urgency"}, \text{"Penalty"}\}$.
4. $G1 = \{\text{"Suppliers"}, \text{"Categories"}, \text{"Products"}\}$; $G2 = \{\text{"Orders"}, \text{"Employees"}, \text{"Customers"}, \text{"Shippers"}\}$; $G3 = \{\text{"Reputation"}, \text{"Urgency"}, \text{"Penalty"}, \text{"Order Details"}\}$.

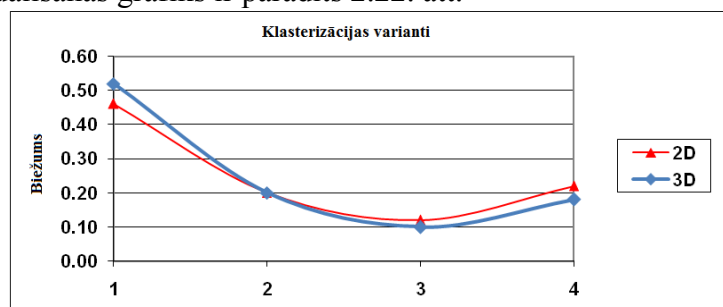
Kā ir redzams, robeža domēns „Order Details” var atrasties kādā no primārām grupām, kuras satur informāciju par pasūtījumiem, produktiem vai steidzamību. Attiecīgi rezultāti arī ir loģiski ticami, jo robežu tabula var būt uzskatīta par vienlīdzīgi attiecināmu uz visiem trijiem primāriem domēniem (gadījumā, ja ar lietotāju netika sniegta nekāda papildu heuristika).

Lai būtu iespēja novērtēt saņemto rezultātu statistisko sadalījumu, darba autors veica eksperimentu kopu, ar mērķi noteikt rezultējošo variantu parādīšanas biežumu – sk. 2.5. tabulu.

2.5. tabula. Klasterizācijas variantu sadalījums

Divdimensiju modelis	Variants	1	2	3	4
	Skaitis	23	10	6	11
	Biežums	0.46	0.2	0.12	0.22
Trīsdimensiju modelis	Variants	1	2	3	4
	Skaitis	26	10	5	9
	Biežums	0.52	0.2	0.1	0.18

Biežuma sadalīšanas grafiks ir parādīts 2.22. att.

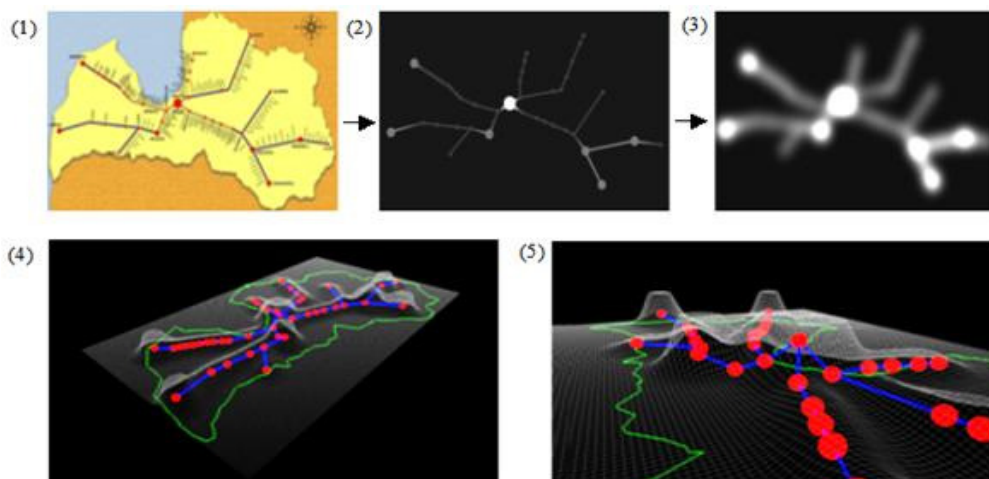


2.22. att. Klasterizācijas variantu sadalījuma biežums

Veicot klasterizācijas rezultātu statistisko apstrādi tika iegūti sekojoši raksturojumi: divdimensiju modelim matemātiskā cerība $M=2.1$, dispersija $D=1.45$ un standartā novirze $\sigma=1.2$. Trīsdimensiju modelim attiecīgi raksturojumi ir sekojoši: $M=1.94$, $D=1.36$, $\sigma=1.17$.

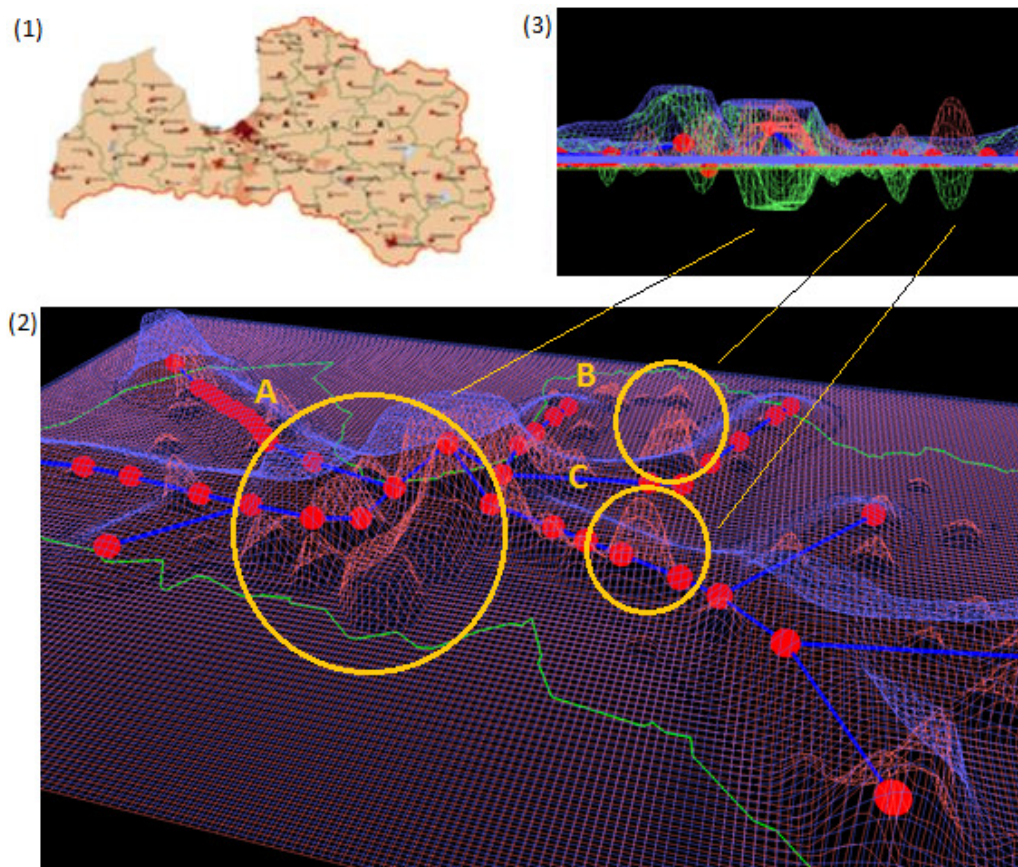
2.4.3. Eksperimenti ar sākotnējo vizuālo analīzi

Lai būtu iespēja novērtēt interpolācijas rezultātus, kuri ir iegūti no vizuālās analīzes, tika izmantota Latvijas dzelzceļa infrastruktūra. Oficiālā karte ar Latvijas lielākām pilsētām un dzelzceļa maršrutiem [13] tika izvēlēta kā ieejas datu kopa – aplū rādiusi ir attiecināmi uz vidējo pasažieru skaitu katrā no stacijām (2.23. att. 1. daļa). Šī karte bija pārveidota virsotņu kartē (2.23. att. 2. daļa) un apstrādāta ar aprakstīto procedūru (2.23. att. 3. daļa). Ir parādīts arī virsotņu kartes vizualizācijas pēdējais solis ar vidēji svērtu pasažieru aktivitātes sadalījumu – 2.23. att. 4. daļa attēlo vispārējo scēnas izskatu, 2.23. att. 5. daļa – fokusējas uz konkrētā reģiona.



2.23. att. Latvijas dzelzceļu tīkls

Lai būtu iespēja identificēt reģionus, kuri ir labvēlīgi tālākai infrastruktūras attīstībai, tika izmantota Latvijas demogrāfiskā karte [2] – 2.24. att. 1. daļa.



2.24. att. Iepriekšējo datu kombinācija ar interpolēto demogrāfisko blīvumu

Attiecīgā augstumu karte bija izgūta no demogrāfiskās kartes un sakombinēta ar iepriekšējo rezultātu, izmantojot vizuālo atdalīšanu ar virsmas krāsas palīdzību (pasažieru aktivitāte – zila krāsa, populācijas blīvums – sarkana krāsa). Šajā gadījumā krāsainais attēls tika pārvērsts par monohromatisko, lai par ieejas datiem kļūtu tikai pikseļu spilgtums. Rezultātā pastāv iespēja vizuāli izšķirt reģionus ar lielu populācijas līmeni un nepietiekamu dzelzeļa infrastruktūras attīstības līmeni (2.24. att. 2. daļa).

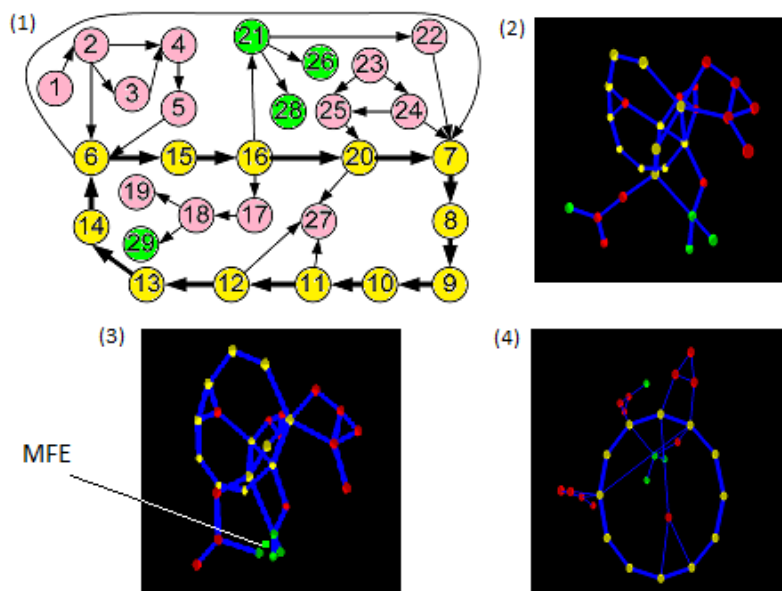
Atņemšanas operatora pielietošana ļauj izšķirt tos reģionus, kur tīkla pārklājums ir lielāks par demogrāfisko kapacitāti (augstumu kartes vērtības ir lielākas par nulli) un tos, kur transportēšanas pakalpojumu pieprasījums ir lielāks par to, kuru piedāvā pašreizējā infrastruktūra (augstumu kartes vērtības ir mazākas par nulli). Atbilstošās kombinētās (zaļas) augstumu kartes vizualizācija ir parādīta 2.24. att. 3. daļā (skats gar negatīvo Z ass labās rokas Dekarta koordināšu sistēmas ietvaros).

Iegūto rezultātu sākotnējā vizuālā analīze atklāja, ka pastāv dažas zonas ar izteiktu „neatbilstību”, piemēram – reģions A (Bauska un tās apkārtnē, kur pašreiz nav aktīvās dzelzeļa infrastruktūras), kā arī reģioni B un C (Valmieras un Jēkabpils apkārtnes, kur potenciālo pasažieru skaits ir lielāks par eksistējošās infrastruktūras kapacitāti). Kaut gan attiecīgi vizualizācijas rezultāti sniedz derīgo informāciju par Latvijas dzelzeļu infrastruktūru un tās demogrāfisko apkārtni, netika mēģināts veikt reālo optimizāciju, jo tā ir lielā mērā atkarīga no citiem faktoriem un ierobežojumiem (ieskaitot vēsturiskus), kuri netika ņemti

vērā. Kā bija minēts metodes teorētiskajā aprakstā, uzsvars šajā gadījumā tiek likts uz sākotnējo analīzi agrīnajās plānošanas stadijās).

2.4.4. Uz krāsu pamatotu magnētisko spēku pielietošanas gadījuma analīze

Lai būtu iespēja demonstrēt uz krāsu pamatotu magnētisko spēku pielietošanas efektu, tika izdarīts eksperiments ar bibliotēkas darbības topoloģisko modeli – sk. [11]. Attiecīgā darba autori ne tikai definēja atbilstošu grafa struktūru, bet arī definēja sistēmas funkcionēšanas galveno ciklu (tas tika identificēts ar ekspertu un attiecas uz grāmatas izņemšanu scenāriju no bibliotēkas). 2.25. att. 1. daļa attēlo oriģinālā plakana grafa topoloģiju. Šajā piemērā galvenā cikla virsotnes ir iekrāsotas dzeltenā krāsā, dažas virsotnes, kuras ir nejauši izvēlētas magnētiskā lauku ģenerators mijiedarbības demonstrācijai, ir iekrāsotas zaļā krāsā, savukārt pārējās virsotnes ir iekrāsotas sarkanā krāsā.



2.25. att. Bibliotēkas topoloģiskā modeļa vizualizācija

Oriģinālās uz spēku iedarbību pamatotas izvietojuma pielietošana producē sākotnējo telpisko modeli (2.25. att. 2. daļa) virtuālajā darba telpā („uz RGB krāsu modeli pamatota saistības” stratēģija tiek izmantota šajā lietošanas gadījumā demonstrācijas nolūkiem).

Nākamais solis ir zaļa spēka MFE ģenerators ieviešana, kurš pievelc un lokalizē zaļās virsotnes labākas vizuālās identifikācijas nolūkiem. To elementu kustība, kuri ir ietekmēti ar spēka MFE ģenerators, producē dināmisko telpiskā moduļa restrukturizāciju – 2.25. att. 3. daļa.

Vēl viens uzdevums, kurš tiek risināts šajā lietošanas gadījumā, ir galvenā funkcionēšanas cikla izcelšana. Šim nolūkam tika aktivizēta dzeltena priekšējā magnētiskā plakne, kura pievelc attiecīgās virsotnes (2.25. att. 4. daļa). Papildus, sekundārais cirkulārais izvietojums tika pielietots visām priekšējās plaknes virsotnēm, vienlaicīgi samazinot atlikušo šķautņu biezumu. Tas uzsvēr analīzes nolūkiem to virsotņu un šķautņu vizuālo reprezentāciju, kuras formē galveno ciklu.

3. Secinājumi

Nemot vērā, ka promocijas darba mērķis bija saistīts ar grafu vizualizācijas un analīzes iespēju paplašināšanu, piedāvājot uzlabotus un savstarpēji savietojamus izvietojanas algoritmus un vizualizācijas tehnikas, šis mērķis tika sasniegts, izpildot sekojošo uzdevumu kopu:

- *Teorētisko pamatu un esošās situācijas grafu vizualizācijas jomā analīze.* Darba ietvaros tika apskatītas vēsturiskās un mūsdienu vizualizācijas jomas tendences, sniedzot saistītu pamatkonceptiju (piemēram – grafu, to izvietojumu, GVS, novērtēšanas metriku utt.), algoritmu, vizualizācijas tehniku, GVS izmantošanas scenāriju (ievērojot saistītus psiholoģiskus un kognitīvus aspektus) un esošu programmatūras risinājumu aprakstu. Attiecīgas specifikācijas, pēc iespējas, tika papildinātas ar matemātisko aprakstu un pseidokodu.
- *Eksistējošo metožu priekšrocību un trūkumu izklāsta sniegšana un esošo pieeju potenciālu uzlabojumu identificēšana.* Tika novērtētas esošo pieeju sarežģītība un veikspēja, kopā ar eksistējošo algoritmu ierobežojumiem (atkarības ziņā starp vizualizējamā grafa struktūru un izmantojamo algoritma klasi). Tas ļāva identificēt tālākās attīstības potenciālus aspektus.
- *Vizualizācijas metožu uzlabošana, modificējot eksistējošus un izstrādājot jaunus algoritmus un vizualizācijas tehnikas.* Bija piedāvāta vizualizācijas metožu kopa, kura iekļauj sevī daļējo hibrīdo algoritmu (apvienojot uz spēku iedarbību pamatotu un uz ortogonalitāti pamatoto algoritmu lietderīgas iezīmes), uzlabotās vizualizācijas tehnikas (apgaismošanas distanci, gradienta trafaretu, ēnu projicēšanu, atbalsta navigāciju) un vizuālās analīzes papildu tipus (vizuālā klasterizācija; sākotnējā vizuālā analīze, kura pamatojas uz kombinētiem grafiem un augstumu kartēm; uz krāsu pamatota mijiedarbība magnētisko lauku modelim).
- *Piedāvāto vizualizācijas metožu implementēšana.* Piedāvātās paplašinātas vizualizācijas metodes tika implementētas 3DIIVE GVS ietvaros kura bija izveidota ar darba autoru. Šī sistēma ļauj vizualizēt grafus trīsdimensiju telpā un sniedz minētu iespēju implementāciju, izmantojot atbilstošus algoritmus un vizualizācijas tehnikas, attiecīgi 4. darba nodaļas izklāstam.
- *Teorētisku pamatojumu sniegšana GVS automatizētai izveidošanai.* Tika piedāvāta trīs līmeņu arhitektūra, kura ir paredzēta GVS automatizētai konstruēšanai. Katrs nākamais šīs arhitektūras līmenis pārvalda progresīvi detalizētākus konstruēšanas aspektus, līdz ar to tiek pārklāta visa nepieciešama funkcionalitāte – sākot ar GVS prasību augsta līmeņa definēšanu un beidzot ar formāliem likumiem, kuri darbojas kā „būvēšanas bloki” iecerētas GVS automatizētai konstruēšanai.
- *Piedāvāto uzlabojumu lietderības apliecināšana, veicot eksperimentus ar reālajiem datiem un novērtējot rezultātus.* Ar 3DIIVE GVS tika veikta eksperimentu kopa, kura ļāva apstiprināt piedāvāto uzlabojumu praktisko nozīmi, pamatojoties uz tādu problēmu jomu analīzi kā Kriminālprocesa informācijas sistēmas prototips, Latvijas republikas dzelzceļu tīklu infrastruktūra, gaisa satiksmes vadības sistēmas vispārīgais modelis, kā arī bibliotēkas topoloģiskais funkcionēšanas modelis.

Visi minēti algoritmu un vizualizācijas tehniku uzlabojumi bija prezentēti starptautiskajās zinātniskajās konferencēs un publicēti starptautiski atzītajos rakstos un žurnālos.

Veicot šī darba izstrādi, tika noformulēti secinājumi, kuri bija iegūti no teorētiskām studijām un praktiskajiem eksperimentiem:

1. Grafu izvietošanas algoritmi un vizualizācijas tehnikas ir relatīvi vāji saistītie koncepti, kuri var būt pielietoti vizualizācijas sesiju ietvaros dažādās kombinācijās vai pat pilnīgi neatkarīgi (piemēram, grafs var būt vizualizēts izmantojot tikai daļējo hibrīdo algoritmu, vai šis algoritms var būt papildus aprīkots ar gradienta trafareta tehniku, vai arī gradienta trafarets var būt izmantots uz grafa modeļa, kurš netika speciāli apstrādāts ar kādu no izvietošanas algoritmiem). Tieši tāpēc galvenais vizualizācijas scenārija uzdevums ir piedāvāt (vai piedāvāt lietotājam izvēlēties) tādu algoritmu un tehniku kombināciju, kura veicinās lietotāja uzdevumu atrisināšanu.
2. Atsevišķos gadījumos, kad lietotāja uzdevumi un analīzes vajadzības var būt skaidri definētas, pastāv iespēja iepriekšdefinēt pieejas, kuras ir optimizētas un noskaņotas šo konkrētu uzdevumu veikšanai (piemēram – piedāvātā cieši saistīto elementu vizuālā klasterizācija, vai uz augstumu kartēm pamatota grafu vizualizācija, kura ir paredzēta ar grafu elementiem saistīto kvantitatīvo vērtību interpolācijai).
3. Tomēr neeksistē vienas unificētās pieejas identificēšanai, kura tieši no vizualizācijas metodēm vislielākā mērā veicinās lietotāja patvaļīgā uzdevuma izpildīšanu, tāpēc tika mēģināts piedāvāt spējāko hibrīda risinājumu, kurš pārņem un integrē esošo algoritmu lietderīgas īpašības, samazinot to atkarību no savietojamām grafu topoloģijām. Ņemot vērā, ka pilnvērtīga visu šajā darbā minēto algoritmu klašu integrācija ir ārpus viena akadēmiskā pētījuma robežām (katras jaunas klases integrācijas sarežģītība tiecas uz eksponenciālo atkarību), tika piedāvāta pilna hibrīdā algoritma jēdziena specifikācija un tās apakšklases implementācija – daļējais hibrīdais algoritms. Šī hibrīda ietvaros uz spēku iedarbību pamatotas un uz ortogonalitāti pamatotas pieejas kombinācija tika novērtēta un apliecināta kā derīga grafu vizualizācijas nolūkiem no kvantitatīvā un kvalitatīvā redzes viedokļiem.
4. Vēl viens aspekts, kurš var ietekmēt konkrētā algoritma vai vizualizācijas tehnikas izvēli, ir saistīts ar to implementācijas specifiku, kura, savukārt, var būt ietekmēta ar ārējiem ierobežojumiem. Kā piemēru var minēt situāciju, kad lietotājam ir nepieciešamas uzsvērt kādu no vizualizējamās scēnas daļām, vienlaicīgi reducējot atlikušo scēnas daļu. Šajā gadījumā ir iespējams izvēlēties izmantot apgaismošanas distanci vai gradienta trafaretu. Galīgā izvēle ir ietekmēta ar to faktu, ka apgaismošanas distance tiek definēta ar matemātiskām izteiksmēm, tāpēc komplekso veidolu gadījuma attiecīgās funkcijas konstruēšana var būt pārāk sarežģīta. Savukārt gradienta trafarets sniedz līdz konkrētām pikselim smalku kontroli, taču pieprasa trafareta buferi klātesamību, kas var pietrūkst konkrētas grafiskās aparatūras realizācijā (kaut gan tas var tikt emulēts programmatūras līmenī, tas negatīvi ietekmēs galīgo grafa vizualizācijas veiktspēju).
5. Veicot jaunu grafu vizualizācijas pieeju izstrādi, ir iespējams pielietot eksistējošās vizualizācijas stratēģijas un pieejas grafu attēlošanas domēna ietvaros. Kā piemēru

var minēt ēnu projekcijas, kuras ir raksturīgas visām CAD sistēmām. Savukārt GVS ietvaros tas ļauj novērtēt un izvēlēties piemērotāko planāru vizualizāciju no dažām projekciju alternatīvām. Analogiski, kompasa koncepts „atbalsta navigācijas” ietvaros ir izgūts no abstraktas iespējas norādīt uz objektiem, savukārt grafu vizualizācijas kontekstā tas ļauj implementēt ērtu mehānismu dināmiskai semantiskai navigācijai starp grafa elementiem. Tajā pat laikā, jebkura no grafu vizualizācijas metodēm var būt izmantota scenārijos ar semantiski atšķirīgiem datu tipiem. Kā piemērs, uz virsotņu kartēm balstītā interpolācija ir lietderīga gan gadījumā, ja grafs reprezentē objektus ar divdimensiju koordinātēm, kuras ir attiecināmas uz abstraktajiem statistiskajiem datiem (sk. darba 4.3. sadaļā), gan arī tajā gadījumā ja tas reprezentē pilnvērtīgu trīsdimensiju rakstura informāciju (sk. darba 4.4. sadaļā).

6. Darba autors piedāvāja programmatūras konstruēšanas risinājuma arhitektūras specifikāciju, kura ir paredzēta GVS sistēmu ģenerācijai. Piedāvātais ietvars paredz veidojamās sistēmas prasību savākšanas pilnu automatizāciju un atbilstošu programmatūras moduļu integrāciju. Ir paredzēts pusautomātiskais validācijas process, kurš tiek veikts ar lietotāju, bet gala novērtējums (atbilstība sākotnēji definētajām prasībām) tiek aprēķināts, pamatojoties uz sākotnēji ievadītajiem datiem. Ģenerējamās GVS kvalitāte ir atkarīga no pieejamo komponentu kopām, kuras tiek uzglabātas attiecīgajos repozitorijos, kā arī no to saistību definēšanas kvalitātes. Kaut gan ietvarā netiek izvirzītas prasības gala lietotāja pieredzei, kurš definē prasības un veic GVS validāciju, šāda veida prasības ir izvirzītas ietvara pārvaldošām personām, kurām ir jāapgūst tā arhitektūra. Esošo risinājumu analīze attiecīgajā domēnā ļāva konstatēt, ka citu GVS ģenerēšanas ietvaru pašreiz nav, kaut gan esošas vispārīgās programmatūras ģenerēšanas sistēmas izmanto līdzīgus programmatūras dzīves cikla automatizācijas principus.
7. Ievērojams praktiskais sasniegums ir saistīts ar vizuālās analīzes iespēju pētīšanu reāli eksistējošā problēmas domēna ietvaros, pamatojoties uz Kriminālprocesa informācijas sistēmas prototipu. Darba 4.1. sadaļa apraksta iespēju izdarīt lietderīgus spriedumus, kuri var ietekmēt notikušo izmeklēšanas procesu, pielietojot vizuālo analīzi potenciāli saistīto kriminālprocesa identifikācijas nolūkiem. Tas ļauj veikt konceptuālo pāreju no situācijas, kad esošā sistēma tiek izmantota vienkārši kā datu reģistrs, uz jaudīgu analītisku risinājumu, kurš nodrošina attiecīgo objektu vizuālo pārvaldību un uztveri. Piedāvātās pieejas efektivitāte tika novērtēta kvantitatīvu mērījumu ietvaros, kas ļāva konstatēt vizualizācijas veikspējas uzlabošanu līdz pat 39% salīdzinājumā ar eksistējošiem algoritmiem.

Literatūra

- [1] F. Beck, M. Burch, S. Diehl. Towards an Aesthetic Dimensions Framework for Dynamic Graph Visualisations. IEEE Computer Society. 2009. pp. 592-597.
- [2] Best Country Reports, 2007. Population Density Map of Latvia. World Trade Press, Petaluma, USA. / Internets – http://www.bestcountryreports.com/Population_Map_Latvia.html, pēdējais apmeklējums 2012. – gada februāris.
- [3] G. Book, N. Keshary. Radial Tree Graph Drawing Algorithm for Representing Large Hierarchies. University of Connecticut. 2001.
- [4] R. Davidson, D. Harel. Drawing graphs nicely using simulated annealing. Proceedings of the Symposium on Graph Drawing , 1996. pp. 76-87.
- [5] P. Eades. A heuristic for graph drawing. Congressus. Numerantium, Vol. 42, 1984, pp. 149-160.
- [6] K. Freivalds, P. Kikusts. Optimum Layout Adjustment Supporting Ordering Constraints in Graph-Like Diagram Drawing. Proc. of the Latvian Academy of Sciences, Section B, Vol. 55 (2001), No. 1, pp. 43-51.
- [7] S. Hong, N. Nikolov. Layered Drawings of Directed Graphs in Three Dimensions. Proceedings of the 2005 Asia-Pacific Symposium on Information Visualisation. 2005. pp. 69–74.
- [8] T. Kamada, S. Kawai. An algorithm for drawing general undirected graphs. Inf. Process. Lett., Vol. 31, Nr. 1 Amsterdam, The Netherlands, The Netherlands: Elsevier North-Holland, Inc. (1989), pp. 7–15.
- [9] M. Kaufmann, D. Wagner. Drawing Graphs: Methods and Models. – Springer. – 2001. – 312 p.
- [10] Microsoft Corp. Northwind Traders Sample Database. / Internets – <http://www.microsoft.com/downloads>, pēdējais apmeklējums 2011. – gada septembris.
- [11] J. Osis, U. Doniņš. Formalization of the UML Class Diagrams // Evaluation of Novel Approaches to Software Engineering. Springer-Verlag, 2010. – pp. 180-192.
- [12] A. Papakostas, I. Tollis, G. Ioannis. Incremental Orthogonal Graph Drawing in Three Dimensions. Graph Drawing, September 18-20, 1997. pp. 52-63.
- [13] Pasažieru Vilciens. Railroad map. Latvijas dzelzeļš, Latvia. 2009. / Internets – <http://www.pv.lv/?cat=298>, pēdējais apmeklējums 2012. – gada jūnijs.
- [14] H. Purchase. Effective information visualisation: a study of graph drawing aesthetics and algorithms. Interacting with Computers, Vol. 13, Nr. 2. 2000. pp. 147-162.
- [15] H. Purchase, S. Bhanji, R. Cohen, M. James. Validating graph drawing aesthetics: A pilot study. Technical Report 336, University of Queensland Department of Computer Science, 1995.

- [16] G. Robertson, J. Mackinlay, S. Card. Cone Trees: Animated 3D Visualization Of Hierarchical Information. Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems New York, NY, USA: ACM. 1991. p. 189--194.
- [17] K. Sugiyama, K. Misue: A Simple and Unified Method for Drawing Graphs: Magnetic-Spring Algorithm. Graph Drawing 1994. pp. 364-375.
- [18] K. Sugiyama, S. Tagawa, M. Toda. Methods for visual understanding of hierarchical system structures. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 11, 1981. pp. 109–125.
- [19] R. Tamassia. On embedding a graph in the grid with the minimum number of bends. SIAM J. Comput., vol. 16. no. 3. pp. 421-444, 1987.
- [20] R. Tamassia, G. Di Battista, C. Batin. Automatic graph drawing and readability of diagrams. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, SMC-18. pp. 61-79, 1988.
- [21] J. Thomas, K. Cook. Illuminating the path: The research and development agenda for visual analytics // IEEE Computer Society – 2005 – 184 p.
- [22] A. Yershov, V. Zabiniako, P. Semenchuk. Using Concatenated Steganography for Visual Analysis in GIS SOA. The 52nd International Scientific Conference of Riga Technical University, Latvia, Riga. October 13, 2011 (pieņemts publicēšanai).
- [23] V. Zabiniako. Visualization of Graph Structures with Magnetic-Spring Model and Color-Coded Interaction. Baltic DB & IS 2012. Tenth International Baltic Conference on Databases and Information Systems. 2012, Vilnius, Lithuania (pieņemts publicēšanai).
- [24] V. Zabiniako. Using Force-Based Graph Layout for Clustering of Relational Data. In: Grundpenkis, J., Kirikova, M., Manolopoulos, Y., Novickis, L. (Eds.) Advances in Databases and Information Systems (Lecture Notes in Computer Science). Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. pp. 193 – 201.
- [25] V. Zabiniako, P. Rusakov. Simultaneous Application of Graphs and Heightmaps for Enhanced Spatial Analysis. In: Saeed, K., Abraham, A. (Eds.) International Journal of Computer Information Systems and Industrial Management Applications (IJCISIM). Machine Intelligence Research Labs, ISSN 2150-7988, Vol. 3, 2011, pp. 522–529.
- [26] V. Zabiniako, P. Rusakov. The Definition of Framework for Automated Creation of Graph Visualization Systems. Scientific Proceedings of Riga Technical University, Computer Science, Applied Computer Systems, ser. 5, vol. 47, 2011, pp. 109 – 115.
- [27] V. Zabiniako, P. Rusakov. Combined Representation of Data with Graphs and Heightmaps for Visual Analysis and Spatial Decision Support. In: Xiao, Y., Muffoletto, R., Amon, T. (Eds.) Proceedings of the IADIS International Conferences. Computer Graphics, Visualization, Computer Vision and Image Processing 2010. Germany: IADIS Press, 2010. pp. 184 – 192.
- [28] V. Zabiniako, P. Rusakov. Graph Drawing in Lightweight Software: Conception and Implementation. In: Skala, V., Hitzer, E.M. (Eds.) Proceedings of the

GraVisMa 2010 Workshop on Computer Graphics, Computer Vision and Mathematics. Czech Republic: Vaclav Skala – Union Agency, 2010. pp. 151 – 154.

- [29] V. Zabiniako, P. Rusakov. Supporting Visual Techniques for Graphs Data Analysis in Three-Dimensional Space. In: Butleris, R., Butkiene R. (Eds.) 17th International Conference on Information and Software Technologies IT 2011 (Research Communications). Lithuania: Kaunas University of Technology, 2011. pp. 75-87.