

TOPOLOGINIO 3D MODELIO KŪRIMO GEOINFORMACINĖSE SISTEMOSE
YPATUMAI

Kęstutis Čypas

Geodezijos ir kadastro katedra, Vilniaus Gedimino technikos universitetas,
Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius-40, Lietuva, el. paštas: Kestutis.Cypas@ap.vtu.lt

Įteikta 2004 06 06, priimta 2005 03 14

Santrauka. Sudarant 3D topologinį modelį geoinformacinių sistemų erdvėje iškyla topologinių ryšių tarp objektų trimatėje erdvėje nustatymo problema. Straipsnyje pateikiamos topologinio 3D modelio kūrimo problemos ir nagrinėjamas teorinis topologinių ryšių nustatymo būdas. Ryšiams nustatyti panaudotas objektiškai orientuotas modelis, pagrįstas simpleksais bei grafų teorija. Galimos topologinės sąsajos trimatėje erdvėje nustatytos taikant devynių susikirtimų modelį. Gautų sąsajų tarp objektų trimatėje erdvėje skaičius skiriasi nuo kitų autorių gautų rezultatų, todėl galima patvirtinti, kad jis priklauso nuo pasirinkto modelio, topologinių sąsajų nustatymo būdo bei kitų išankstinių sąlygų.

Raktažodžiai. 3D GIS modelis, topologinės sąsajos 3D erdvėje.

1. Įvadas

Skaitmeninio 3D GIS modelio poreikis bei realizavimo būdai aptariami įvairiose konferencijose, seminaruose, straipsniuose. Tobulėjant technologijoms bei intensyvėjant ekonominiam augimui informacinių technologijų ir telekomunikacijų srityje didėja sprendimų, pagrįstų informacinių technologijų taikymu, poreikis, taigi daugėja 3D GIS modelių taikymo sričių. Šiandien tai – miestų urbanistinis projektavimas, nekilnojamojo turto kadastras, telekomunikacijų tinklo modeliavimas, gelbėjimo tarnybų operacijų planavimas, aplinkos monitoringas, triukšmo lygio prognozavimas, potvynių prognozavimas, taršos modeliavimas; geologinis modeliavimas ir kt [1]. Šiame straipsnyje aptariami topologinio 3D GIS modelio teoriniai kūrimo ypatumai ir problemos. Jo poreikis ypač svarbus nekilnojamojo turto kadastrė, ten, kur svarbios sąsajos tarp objektų ne tik plokštumoje, bet ir vertikalioje erdvėje. Be abejo, 3D GIS modelius taikyti tik vienoje srityje tampa labai brangu, todėl tik jungiant taikymo sritis galima sumažinti tokio topologinio 3D modelio parengimo bei kūrimo sąnaudas. Taikymo sričių mastas priklauso nuo to, kiek toks modelis gali būti naudingas kitoms sritims. Komercinių programų gamintojai laukia mokslininkų, siūlančių įdiegimo technologijas, rezultatų, todėl ši sritis tampa labai aktuali.

Jau įprasta, kad GIS duomenys saugomi centrinėse reliacinėse duomenų bazėse (RDBVS), kurios gali veikti ir paskirstytųjų duomenų bazių režimu, t. y. kai skirtingų nuosavybių duomenys saugomi skirtingose GIS duomenų tarnybinėse stotyse [2], taigi ir 3D GIS modelis privalo remtis centrinių paskirstytųjų duomenų bazių principais. Kol kas nėra komercinių 3D GIS topologinio modelio

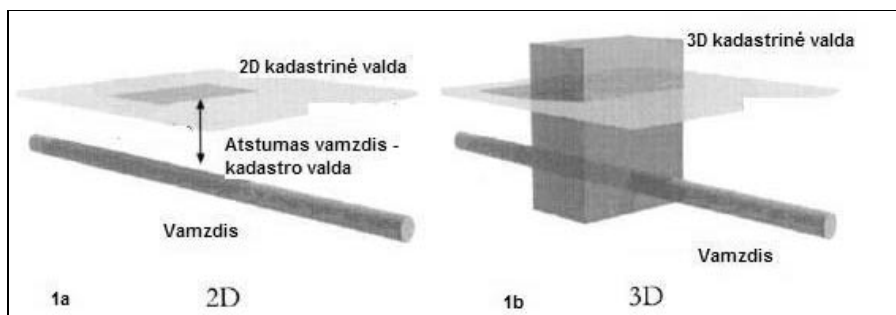
sprendimų, viena iš priežasčių – OGC (*Open GIS Consortium*) parengta specifikacija kol kas neapima 3D objektų. Šiuo metu tokia specifikacija yra rengiama, tačiau ji labai priklauso nuo suinteresuotųjų sričių poreikio bei mokslinių tyrimų rezultatų, kuriais remiantis galima būtų efektyviai įdiegti 3D GIS modelį. Nepaisant to, 3D GIS technologijos sparčiai tobulėja, tačiau neesant vieningos specifikacijos (reikalavimų) iš esmės susiduriama su šiais sunkumais: 3D GIS objektų konstravimas (kūrimas, redagavimas), manipuliavimas ir analizė (užklausa, sankirta, buferių generavimas, trumpiausio kelio radimas), 3D GIS duomenų organizavimas [3].

Erdvinė analizė dažnai laikoma vienu iš svarbiausių geoinformacinių sistemų uždavinių. 3D GIS analizė tebėra iki galo neišspręstas uždavinys, ir mokslininkai intensyviai tebedirba. Gali būti skiriami du aspektai: kaip objektai ir jų erdviniai ryšiai turėtų būti reprezentuojami bei kokia technika naudojama tiems ryšiams atpažinti.

Straipsnyje analizuojamas grafų taikymas objektams aprašyti 3D erdvėje. Nagrinėjamas topologinis 3D GIS modelis remiasi objektiškai orientuoto modelio struktūra, rekomenduojama literatūroje [4]. Toliau nagrinėjamas ir galimos sąsajos tarp objektų R^3 erdvėje lyginant su anksčiau nustatytais sąsajomis.

2. 3D topologinio modelio taikymas urbanizuotose teritorijose

Urbanizuotose teritorijose, kur intensyvus žemės naudojimas, tankus užstatymas, bręsta poreikis 3D GIS modelį taikyti kadastruose. Kyla būtinybė šiose teritorijose išnaudoti erdvę, esančią po žeme ar virš žemės, bei tokias valdas registruoti juridškai. Pirmieji



1 pav. Kadastro valda ir po ja einantis vamzdis dalinio 3D modelio atveju ir pilnutinio 3D modelio atveju
Fig 1. Cadastre domain and pipe below with partial 3D model case and full 3D model case

analizavimo etapai parodė, kad toks poreikis tikrai yra, tačiau daug neaiškumų dėl tokio valdos objekto apibrėžimo esti ir juridinėje, ir GIS plotmėse [5]. Kita iš problemų – didelės tokios sistemos sukūrimo ir palaikymo sąnaudos. Kadastrų informacinėse sistemose naudojami ir skaitmeniniai žemėlapiai, savo ruožtu sudaromi ir naudojami kitų atsakingųjų institucijų, kuriančių skirtingos tematikos skaitmeninius žemėlapius, todėl siūloma duomenis kurti bendrai. Miestų savivaldybės, atsakingos už miesto stambiojo mastelio kartografinės medžiagos patikimumą ir naujumą bei kuriančios miestų plėtros strateginius planus, taip pat supranta poreikį tokią informaciją kaupiti ir panaudoti. Inžinerinių komunikacijų įmonėms tokios informacijos saugojimas leidžia daug kokybiškiau ir efektyviau projektuoti rekonstrukcijas, statybas ne tik joms pačioms, bet ir kitoms įmonėms, toje teritorijoje atliekančioms statybos ar rekonstravimo darbus.

Viena iš užklausų, pasitaikančių atliekant teritorinį miesto projektavimą – rasti savininkus, susijusius su objektu ar reiškiniu, paplitusiu geografiniu požiūriu (inžinerinės komunikacijos, jų projektas, kelio projektas, taršos paplitimas, kt.). Tokiu atveju daroma reiškinio ar objekto sankirta 2D erdvėje su kadastrine valda ir nustatoma, ar yra bendrų dalių. Iš tikrųjų tai užklausa, kuri remiasi sąsajų tarp objektų savybėmis, t. y. tai topologinė užklausa. Kaip tokia užklausa galėtų būti realizuojama naudojant 3D modelį? Iš esmės klausimas tuomet būtų panašus: „ar objektai susikerta erdvėje, t. y. ar turi bendrų dalių?“ Jei objektai kertasi 2D erdvėje, jie nebūtinai kirsis 3D erdvėje. Nagrinėjant šį klausimą galima būtų nusibrėžti tokias sąlygas:

1) dalinis 3D modelis – kadastro objektas (valda) lieka 2D erdvėje, objektas, su kuriuo valda sukertama, turi 3D savybes (1 pav. a);

2) pilnutinis 3D modelis – ir kadastro objektas, t. y. valda, ir objektas turi 3D savybes (1 pav. b) [6].

Pirmuoju atveju būtų būtina:

a) „susieti“ objektus įvedant atstumą iki kadastrinės valdos kaip požeminės komunikacijos objekto atributą (paprastai inžinerinės komunikacijos įgilinimas yra žinomas tik atraminuosiuose taškuose);

b) apskaičiuoti atstumą tarp objektų.

Antruoju atveju, kai abu objektai turi 3D savybių, atsakymas būtų daug svarbesnis. Šiuo atveju topologinis modelis leistų tiksliai atsakyti į šį klausimą – inžinerinės

komunikacijos kerta kadastro objektą tam tikroje vietoje, kuri apibūdinama koordinatėmis.

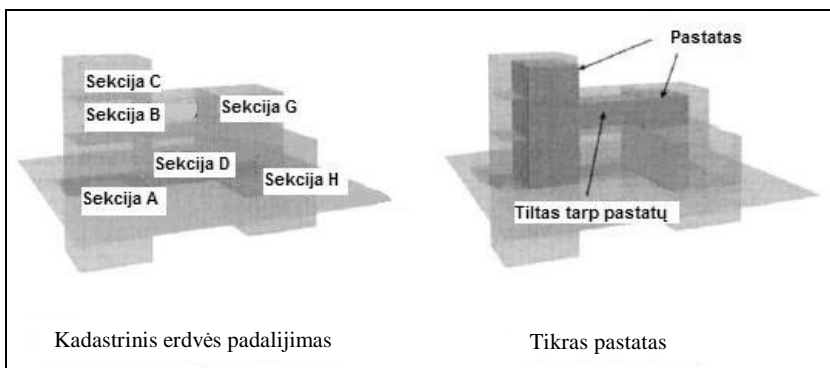
Erdvinės sankirtos, apibrėžus topologinius ryšius tarp 3D objektų, būtų įmanomos ir tarp tūrinių objektų bei 3D savybes turinčių reiškinių, pvz.: pastatų ir kadastrinių valdų, pastatų ir taršos (taip pat triukšmo), telekomunikacijų bangų sklaidimo.

Įmanomas būdas – erdvę skaidyti, pvz.: kadastro valdomis, jam realizuoti būtina žinoti ir erdvines sąsajas tarp 3D objektų (2 pav.) [6].

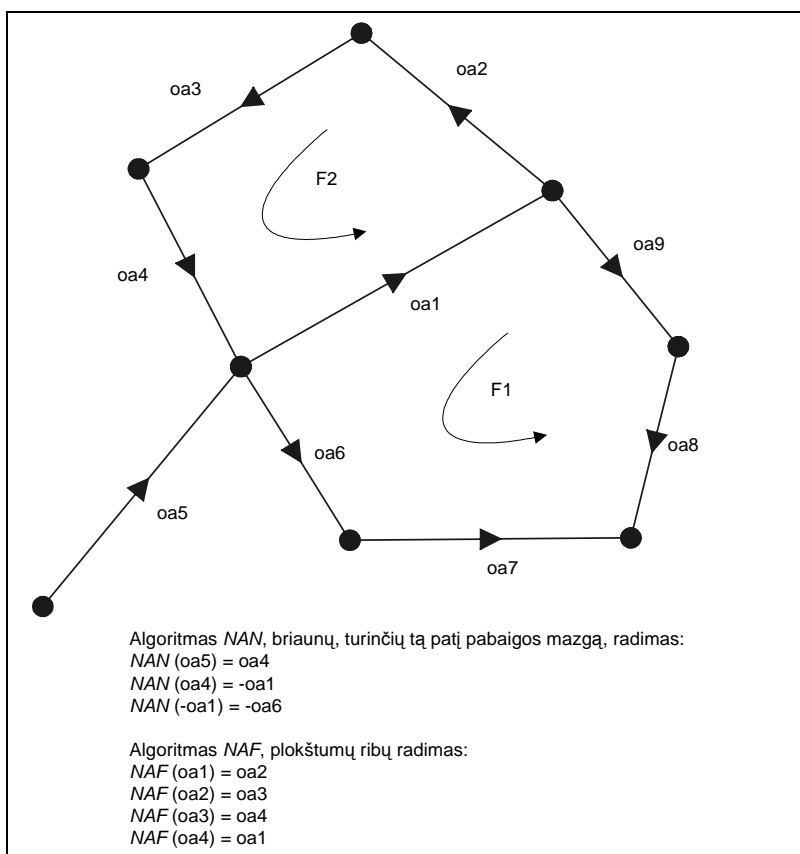
3. Objektų aprašymas grafais 3D erdvėje

Topologijos taikymas sąsajoms tarp objektų apibrėžti leidžia išsaugoti šias sąsajas atliekant įvairias transformacijas, tokias kaip vertimas, sukimas, didinimas. Daugelis realaus pasaulio 2D modelių, kurie užtikrina topologiją, pagrįsti grafų teorija. Planinėje erdvėje grafas reprezentuojamas briaunomis ir viršūnėmis, esant briaunų susikirtimams, papildomai ir mazgais. Tinklo bei poligonų analizė taip pat atliekama taikant grafus: bet kokiam orientuotajam grafui yra tik vienas poligonas iš dešinės ir tik vienas poligonas iš kairės (3 pav.). Pvz., poligono briaunoms rasti taikomas algoritmas *NAF* (*next oriented arc with the same face*), kuris randa kitą orientuotąjį grafą, priklausantį tam pačiam poligonui ir esančiam iš kairės (3 pav.), o algoritmas *NAN* (*next oriented arc with the same end node*) gauna kitą orientuotąjį grafą su tuo pačiu mazgu (3 pav.).

Toks modelis, deja, negali būti taikomas 3D erdvėje tiesiogiai. Taikant šį modelį kyla problemų, nes ta pati briauna 3D modelyje gali priklausyti daugiau nei dviems poligonams. Tačiau tokio modelio orientuotąjį grafą išskaidžius į du skirtingus objektus – į orientuotąjį poligoną (arba kitaip – paviršių, plokštumą) ir į porą – plokštumą su orientuotuoju grafu (žymima: plokštuma, orientuotasis grafas), galima šią problemą išspręsti [4]. Palyginti su 2D objektais, orientuotasis grafas atitiktų porą – briauną su kryptimi ir pabaigos mazgu. Vis dėlto nors ir yra atitikmuo tarp orientuotojo grafo ir poros – briaunos su kryptimi ir pabaigos mazgu 2D erdvėje, realiai nėra atitikmens 3D erdvėje tarp orientuotosios plokštumos ir poros (plokštuma, orientuotasis grafas), nes orientuotoji plokštuma gali nurodyti kelias poras (plokštuma, orientuotasis grafas), kadangi plokštumos ribą gali sudaryti keli orientuotieji grafai. Atitikmenys pateikti 1 lentelėje.



2 pav. Kadastrinis erdvės padalijimas
Fig 2. Cadastral space partition



3 pav. Topologijos algoritmų pavyzdys 2D
Fig 3. Example of topological algorithms in 2D

1 lentelė. Atitikmenys 2D ir 3D erdvėse
Table 1. Equivalences between 2D and 3D spaces

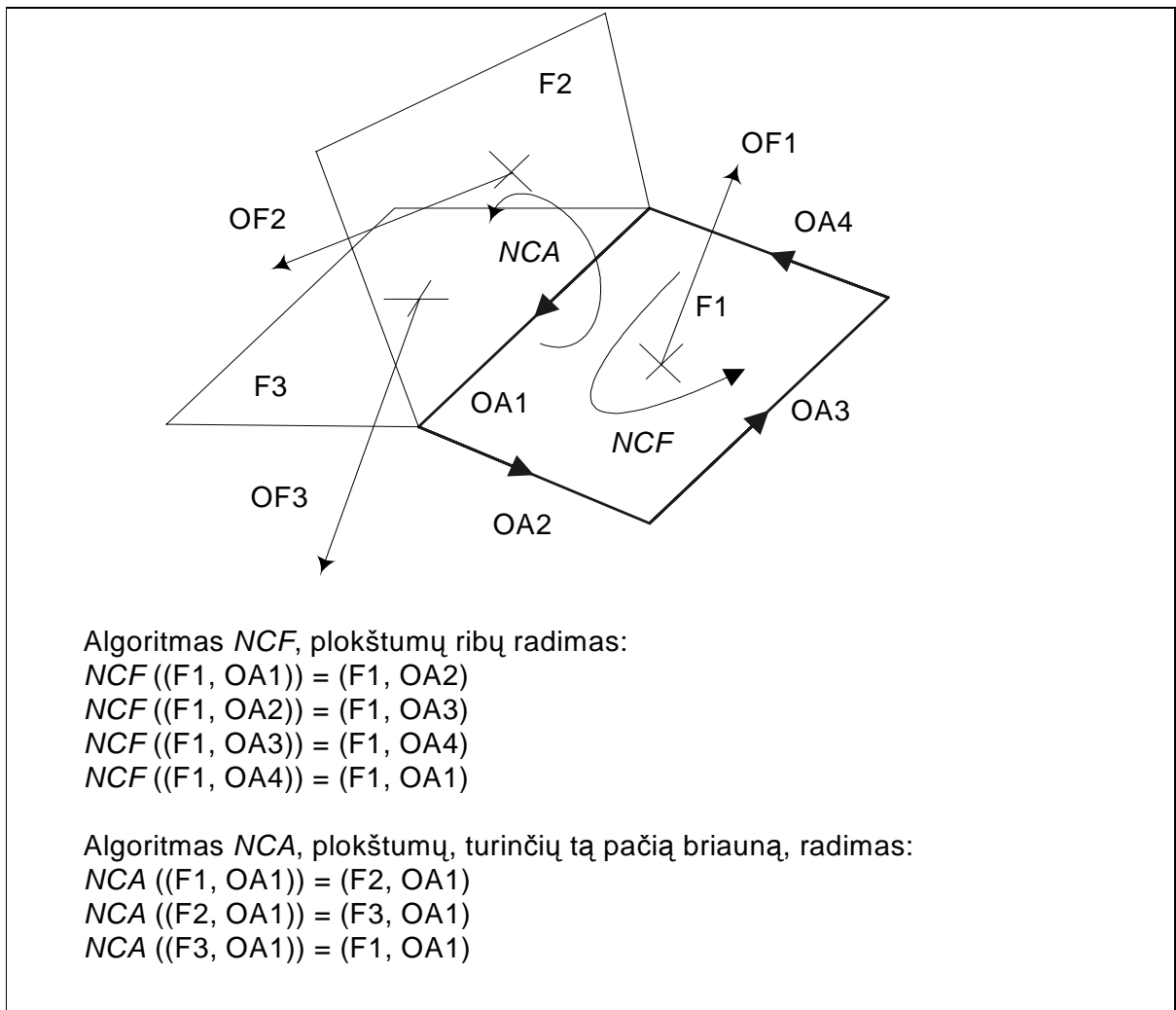
2D topologinis modelis	3D topologinis modelis
Briauna	Paviršius arba plokštuma (<i>face</i>)
Poligonas dešinėje	Tūris (<i>volume</i>) dešinėje
Orientuotasis grafas	Orientuotasis paviršius
Orientuotasis grafas	Plokštuma, orientuotasis grafas
<i>INV</i>	<i>NCF</i>
<i>NAN</i>	<i>NCA</i>
<i>INV</i>	<i>INV</i>
<i>NAF</i>	$NCA \circ INV$
Poligonas (<i>face</i>)	Tūris (<i>volume</i>)
Skylė (<i>hole</i>)	Kiaurymė, tuščia ertmė, erdvė (<i>cavity</i>)

Ryšiai tarp 3D objektų porų išvesti remiantis ryšiais 2D erdvėje. Taigi keičiami šie algoritmai: *INV* (kita pora toje pačioje briaunoje (inversija), *next couple with the same edge*) į *NCF* (kita pora toje pačioje plokštumoje, *next couple with the same face*), *NAN* (kitas orientuotasis grafas su tuo pačiu pabaigos mazgu, *next oriented arc with the same end node*) į *NCA* (kita pora tame pačiame orientuotame grafe, *next couple with the same oriented arc*) ir *INV* (inversijos pora). Toks ryšių aprašymas leistų nustatyti plokštumos ribas (kontūrus) taikant algoritmą *NCF*, t. y. tik vieną porą (plokštumą, orientuotąjį grafą), bei rasti visas plokštumas, turinčias vieną briauną, algoritmas *NCA* (4 pav.) – ir visus orientuotuosius grafus, kurie turi tą patį pabaigos mazgą, tūrio riboms nustatyti.

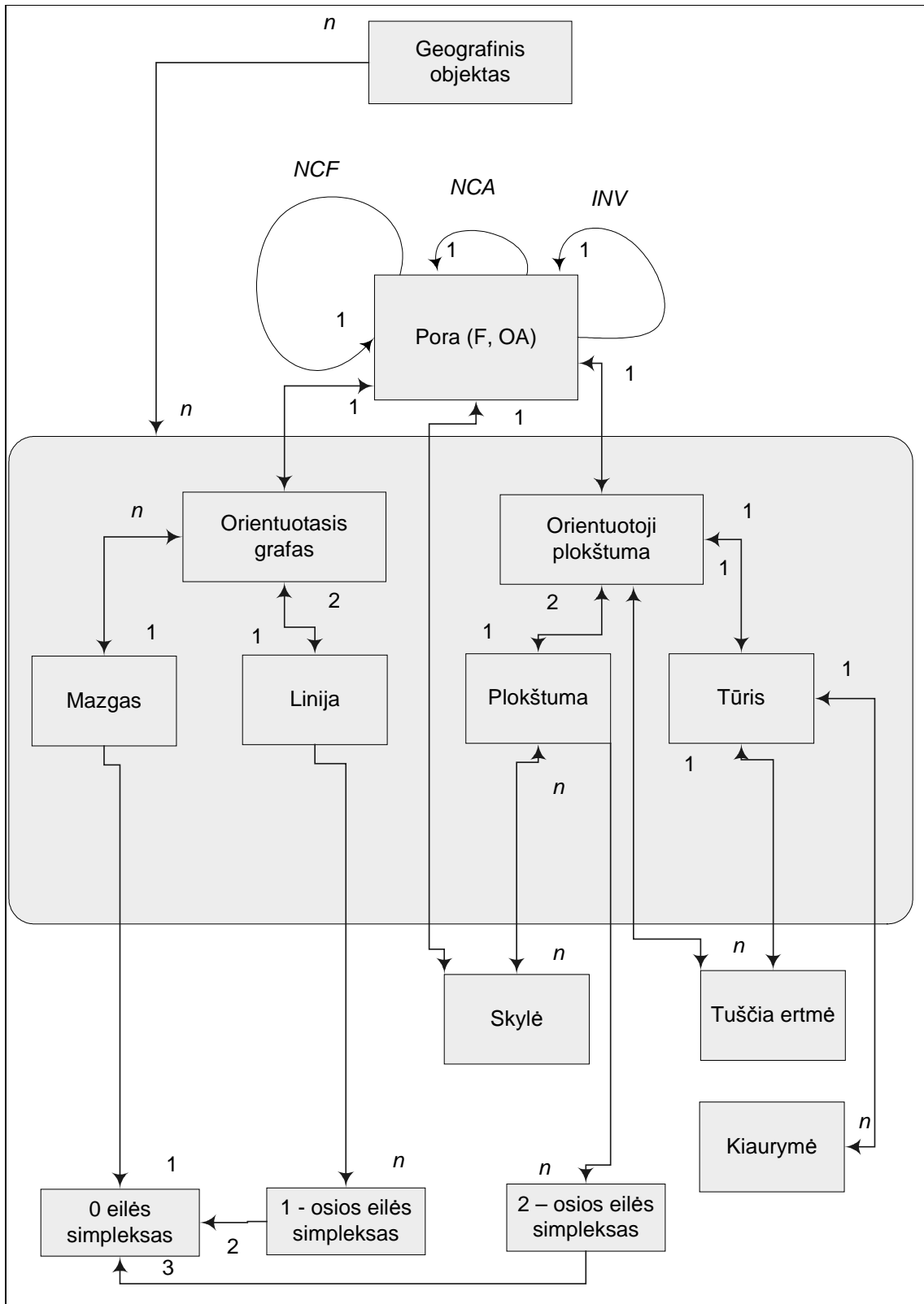
4. Simpleksų taikymas 3D modeliuoti

Topologiniams ryšiams užtikrinti geometriniu lyg-

meniu gali būti taikomi simpleksai. Simpleksais aprašomi neorientuotieji objektai, nes orientuotieji objektai apibūdinami neorientuotaisiais objektais (5 pav.). Erdviniai objektai klasifikuojami pagal dimensiją, kiekvienai dimensijai egzistuoja minimalus objektas, vadinamas simpleksu [7]. Bet koks n -osios dimensijos simpleksas yra sudarytas iš $(n+1)$ geometriškai nepriklausomų $(n-1)$ dimensijos simpleksų. Pavyzdžiui, trikampis yra 2-osios dimensijos simpleksas, sudarytas iš trijų 1-osios dimensijos simpleksų. Šie 1-osios dimensijos simpleksai yra geometriškai nepriklausomi, jei nėra dviejų lygiagrečių briaunų ir nėra briaunų, kurių ilgis lygus 0 [7]. Mažiausias erdvinis objektas yra 0 dimensijos simpleksas, kuris išreiškia mazgus, 1-osios dimensijos simpleksai išreiškia briaunas, 2-osios dimensijos simpleksai – trikampius, 3-osios dimensijos simpleksai išreiškia tetraedrus.



4 pav. Topologijos algoritmų pavyzdys 3D
Fig 4. Example of topological algorithms in 3D



5 pav. 3D GIS modelis
 Fig 5. 3D GIS model

3D ryšiams aprašyti pakanka apsiriboti k -osios dimensijos simpleksu, kai $0 \leq k \leq 3$. Taigi tūriniai objektai susidės iš tetraedrų, toks suskaidymas leistų valdyti topologinius ryšius tarp objektų bei tarp kompleksinių plokštumų (su skylėmis ir kt.). Topologinis ryšys užtikrinamas tarp pačių objektų, tiesioginis simpleksų topologinis valdymas iš tikrųjų nėra atliekamas, tai atimtų daug vietos saugojimo laikmenose bei laiko apdorojant užklausas. Kai yra skylių, kiaurymių bei tuščių erdvių, plokštumų nebūtina dalyti į kelias dalis.

Skaidymas į simpleksus iš esmės tinka briaunoms ir plokštumoms (kaip ir 2D erdvėje, kur poligonus skaidyti į trikampius nėra svarbu), tūrinių objektų skaidymas į tetraedrus iš esmės atliekamas tūriams skaičiuoti, tačiau modelyje 3-osios dimensijos simpleksai nesaugomi.

5. 3D GIS topologinis modelis

Siūlomas 3D GIS topologinis modelis, pristatytas de la A. Losa ir B. Cervelle [4], yra objektiškai orientuotas (5 pav.), tai realizuota saugant plokštumas ir susijusias jas apibūdinančias bendras briaunas modelyje. Taip užtikrinami topologiniai ryšiai. Modelyje saugomi orientuotieji grafai, susiję su mazgais ir linijomis, orientuotieji paviršiai, susiję su plokštumomis ir tūriais, bei poros (plokštuma, orientuotasis grafas). Toks modelis leidžia valdyti tuščias ertmes bei kiaurymes (6 pav.).

6. Topologiniai ryšiai 3D erdvėje

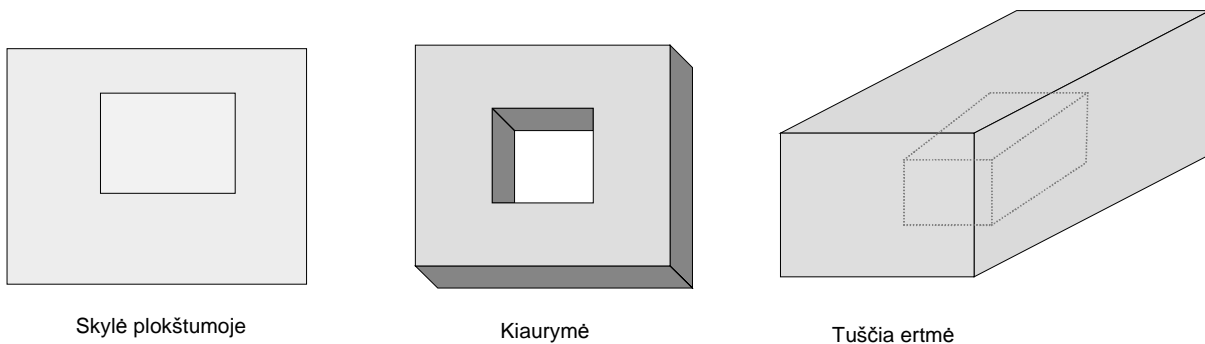
Topologiniams ryšiams apibūdinti 3D erdvėje taikomas 9 susikirtimų modelis (*9 intersection model*) [8]. Jis patvirtintas *OpenGIS* konsorciumo kaip diegti tinkama struktūra. Jo esmė – sankirtų tarp objektų A ir B apibūdinimas toje pačioje topologinėje erdvėje Λ taikant ribą (*boundary*, ∂A , ∂B), vartojant vidaus (*interior*, A° , B°) ir išorės (*exterior*, A^- , B^-) sąvokas. Tada binarinis ryšys $R(A, B)$ tarp objektų identifikuojamas komponuojant visas galimas sankirtas tarp 6 topologinių primityvų [8]:

$$R(A, B) = \begin{bmatrix} \partial A \cap \partial B & \partial A \cap B^\circ & \partial A \cap B^{-1} \\ A^\circ \cap \partial B & A^\circ \cap B^\circ & A^\circ \cap B^{-1} \\ A^{-1} \cap \partial B & A^{-1} \cap B^\circ & A^{-1} \cap B^{-1} \end{bmatrix}$$

Sankirtos rezultatas – tuščioji aibė (\emptyset) arba netuščioji aibė ($\neg\emptyset$). Pvz., jei du objektai turi bendrą ribą, sankirta tarp dviejų ribų yra netuščioji aibė, t. y. $\partial A \cap \partial B = \neg\emptyset$; jei yra susikertančių vidaus erdvių, tuomet sankirtos rezultatas yra netuščioji aibė, t. y. $A^\circ \cap B^\circ = \neg\emptyset$. Kadangi principas yra toks, kad kiekviena sankirtos pora gali būti tuščioji aibė arba netuščioji aibė, skirtingi modeliai aprašo skirtingus ryšius. Teoriškai ryšių sankirtų kombinacijų skaičius gali būti 2^9 , t. y. 512, jei įtrauksime ir objektų dimensijas (0, 1, 2, 3D, kur 0 – taškas, 1 – linija, 2 – plokštuma, paviršius, 3 – tūris), tai kombinacijų skaičius padidės iki $512 \times 16 = 8192$, tačiau praktikoje bus naudojamas tik nedidelis kombinacijų skaičius. Skirtingų tyrimų šioje srityje rezultatai skirtingi (priklausomai nuo modelio), todėl kiekvienas atvejis turi būti nagrinėjamas atskirai.

Šio tyrimo metu buvo nagrinėjami galimi ryšiai ir lyginami su gautais anksčiau. Taškai bus žymimi P , linijos L , plokštumos S , tūriai B . Pažymėjimas $R(L, S)$ reikštų binarinį ryšį tarp linijos ir plokštumos, kai linija imama kaip pirmasis objektas. Ryšys $R(S, L)$ yra atvirkščias ryšys, vadinamas atvirkštine sąlygos dalimi. Paprastumo dėlei tuščioji aibė žymima 0, o netuščioji 1. Tada ryšys tarp objektų su nesuskirtančiomis ribomis ir vidaus erdvėmis žymimas 000011111, šį binarinį (dvejetainį) kodą pavertę dešimtainiu gausime 31, žymima R031 (ryšys „nesusikerta“). Apibendrintieji tyrimo rezultatai pateikiami 2 lentelėje.

Rezultatai gauti pirmiausia atmetant neįmanomus ryšius ir tuomet nagrinėjant kiekvieną sankirtą tarp objektų P, L, S, B skirtingoje erdvėje IR, IR^2, IR^3 [9]. Gauti ryšiai klasifikuojami: nesikerta (*disjoint*), turi savyje, apima (*contains*), yra viduje (*inside*), lygūs (*equal*), ribojasi (*meet*), dengia (*covers*), dengiamas (*covered by*), uždengtas (*overlap*).



6 pav. Skylės, kiaurymės, tuščios ertmės pavyzdys
Fig 6. Examples of hole, opened hole, cavity

2 lentelė. Ryšiai tarp objektų IR, IR^2, IR^3 erdvėje
Table 2. Relations between objects in IR, IR^2, IR^3 spaces

Ryšiai $R(X, Y)$	Ryšių skaičius
BL, LB (tūris ir linija IR^3 , <i>body and line</i>)	19
BS, SB (tūris ir plokštuma IR^3 , <i>body and surface</i>)	19
BB (tūris ir tūris IR^3 , <i>body and body</i>)	8
PB (taškas ir tūris IR^3 , <i>point and body</i>)	3
SL, LS (plokštuma ir linija IR^2, IR^3 , <i>surface and line</i>)	31
SS (plokštuma ir plokštuma IR^2, IR^3 , <i>surface and surface</i>)	38
PS, SP (taškas ir plokštuma IR^2, IR^3 , <i>point and surface</i>)	3
LL (linija ir linija IR, IR^2, IR^3 , <i>line and line</i>)	33
PL, LP (taškas ir linija IR, IR^2, IR^3 , <i>point and line</i>)	3
PP (taškas ir taškas IR, IR^2, IR^3 , <i>point and point</i>)	2
Iš viso:	159

7. Išvados

1. Nustatyti topologiniai ryšiai 3D erdvėje tarp 0, 1, 2, 3 dimensijos objektų, taikant 9 sankirtų topologinių modelių objektiškai orientuotam modeliui, pagrįstam grafų teorijos principais.

2. Nustatytų topologinių ryšių skaičius skiriasi nuo kitų autorių gautų ryšių skaičiaus. Tai dar kartą įrodo, kad vieno bendro atsakymo nėra, o rezultatas priklauso nuo nagrinėjamo 3D GIS modelio bei nustatytųjų sąlygų.

3. Topologinių ryšių modelis gali būti diegiamas nustatant išankstines sąlygas, taisykles ir apribojimus. Kadangi topologinių ryšių skaičius gana didelis, visus įdiegti būtų sudėtinga ir nebūtina, todėl reikėtų pradėti nuo svarbiausiųjų, o konkretų ryšį parinkti galėtų vartotojas.

Literatūra

1. Čypas, K. Preparation of 3D digital city model development technology based on geoinformation systems. *Geodezija ir kartografija (Geodesy and Cartography)*, Vol XXIX, No 3. Vilnius: Technika, 2003. 90–97 p.
2. Stankevičius, Ž. Investigation of city geographic information system optimality (Miesto geoinformacinės sistemos optimalumo tyrimas). PhD dissertation. Vilnius, 2000.
3. Stoter, J.; Zlatanova, S. 3D GIS, where are we standing? ISPRS Joint Workshop on „Spatial, Temporal and Multi-Dimensional Data Modelling and Analysis“, Quebec, Canada, Oct 2003.

4. De la Losa, A.; Cervelle, B. 3D Topological modeling and visualization for 3D GIS. *Computers & Graphics*, No 23, 1999, p. 469–478.
5. Lemmen, C.; Van Oosterom, P. 3D Cadastres. *Computers, Environment and Urban Systems*, Vol 27, 2003. 337–343 p.
6. Billen, R.; Zlatanova, S. 3D spatial relationships model: a useful concept for 3D cadastre? *Computers, Environment and Urban Systems*, Vol 27, 2003, p. 411–425.
7. Egenhofer, M. J.; Frank, A. U.; Jackson, J. P. A topological data model for spatial databases. National Center for Geographic Information and Analysis, Technical report, No 104, 1989. 1–17 p.
8. Egenhofer, M. J.; Herring, J. R. A mathematical framework for the definition of topological relationships. In: *Proceedings of Fourth International Symposium on SDH*. Zurich, Switzerland, 1990. p. 803–813.
9. Zlatanova, S. 3D GIS for Urban development. PhD thesis, ITC. The Netherlands, 2000. 222 p.

Keštutis ČYPAS. Doctoral student. Vilnius Gediminas Technical University, Dept of Geodesy and Cadastre, Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius-40, Lithuania (Ph +37052744703), e-mail: keštutis.cypas@ap.vtu.lt.

A graduate of Vilnius Gediminas Technical University (VGTU) (MSc, 2001). Post graduate studies at Gjoevik University College in 1998. Author of 3 publications. Research interests: geoinformation systems, 3D modelling.