

**Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta
Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie**

**Charles University in Prague, Faculty of Science
Department of Applied Geoinformatics and Cartography**

*Doktorský studijní program: Kartografie, geoinformatika a dálkový průzkum Země
Ph.D. study program: Cartography, Geoinformatics and Remote Sensing*

**Autoreferát dizertační práce
Summary of the Ph.D. Thesis**



Feature-based multi-resolution topography

**Víceměřítková reprezentace topografického
povrchu založená na geoprvcích**

Lukáš Brůha

*Školitel/Supervisor: Ing. Tomáš Bayer, Ph.D.
Praha, 2016*

Pedagogická činnost / Teaching Courses (2008–2016)

Úvod do GIS, Geoinformační systémy, Epidemiologie a GIS, Programování pro GIS, Principy databází (Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta)

Introduction to GIS, Geographic information systems, Epidemiology and GIS, Introduction to database systems (Charles University in Prague, Faculty of Science)

Seznam publikací / Selected publications

Recenzované publikace / Peer-reviewed publications

Brůha, L. and J. Kolář. Feature-based enhancement of multi-resolution topographic surface. In *Proceedings of 6th International Conference on Cartography & GIS*. June, 2016, pp. 643 – 650, Albena, Bulgaria. ISSN: 1314-0604

Brůha, L. Large geospatial images discovery: metadata model and technological framework. *Geoinformatics FCE CTU*. 2015, vol. 14, iss. 2, pp. 21-36. ISSN: 1802-2669.

Brůha, L. Automation of geospatial raster data analysis and metadata updating: in-database approach. *AUC Geographica*. 2014, vol. 49, iss. 2. ISSN 0300-5402.

Certifikovaná metodika / Certified methodology

Brůha, L. Certifikovaná metodika pro tvorbu metadat kartografických dokumentů. Praha: Přírodovědecká fakulta UK, 2015

Software

Brůha, L. 2014. MTDTRasPub. Software pro správu, vyhledávání publikací a on-line prezentaci kartografických dokumentů.

Ostatní / Other

Brůha, Lukáš. Automatická publikace metadat a dat pro mapové a katalogové systémy z rastrových podkladů v PostgreSQL. Historická kartografie a její prezentace, 2013, Praha

Abstract

A three-dimensional (3D) representation of the topographic surface is an important element in planning, civil engineering and mapping. Many state-of-the-art representations of topographic surface provided graphical, 3D model of entire planet. However, the existing solutions to 3D representation of topographic surface lack the geometric flexibility and accuracy on boundaries with models of other geographic features.

Most of contemporary approaches to digital Earth solutions focus on the visualization performance. The high visual performance is achieved by the use of special data structures optimized for rendering. However, this optimization towards visualization hampers the data management of spatial data, their analysis and distribution.

Therefore, the introduced solution reflects on multiple requirements of digital Earth systems. In addition to the visualization performance, the properties regarding data interoperability, data management and distribution, data analysis and the multiple level of detail (LOD) are considered as essential for the design of the new solution.

The topographic surface is central to the proposed method. This work introduces a new, more functional data representation of multi-resolution topographic surface.

This representation is globally applicable and allows to populate the terrain surface with new geographic features that support multiple LODs.

The presented solution to representation of spatial features for multiple LOD environment is rooted in the concept of footprint. Exploitation of this concept alleviates from the structural complexity of pure 3D solutions, but it also supports the extension to true 3D, when needed.

As a prerequisite, the method for footprint analysis is developed to deal with features originating from disparate data sources and pursue the interoperability requirements.

Thereafter, the simultaneous simplification algorithm is proposed. It is designed to build the multiple LOD database of features in such a manner, that the topological relations between features are preserved in the multiple LOD environment, which is reconstructed on its grounds.

Since the topological relation between the feature and terrain is essential for many geo-spatial analyses, this thesis proposes two methods to carry out the generalization of distinct spatial features with respect to the geometry of terrain. It is also shown, how the important morphological structure of the terrain can be obtained and subsequently preserved on coarser levels of resolution. The methodological framework introduced in the thesis employs the Global Indexing Grid (GIG) as an indexing and paging mechanism.

Abstrakt

Datové reprezentace topografického povrchu ve třídímním (3D) prostoru jsou důležitým nástrojem v plánování, stavebním inženýrství či mapování. Množství nejnovějších reprezentací povrchu poskytlo grafický 3D model celé planety. Existující 3D řešení nicméně postrádají flexibilitu a přesnost na hranicích s modely jiných geografických objektů.

Proto předkládané řešení zohledňuje četné požadavky takovýchto geoinformačních systémů s globálním prostorovým pokrytím. Kromě nutnosti vysokého výkonu vizualizace dat jsou zohledněny požadavky na interoperabilitu dat, řízení správy dat a jejich distribuce, analýzu dat a podporu více úrovní rozlišení.

Topografický povrch má v navrhované metodě klíčovou, sjednocující roli. Dizertační práce představuje novou datovou reprezentaci topografického povrchu s podporou víceúrovňového rozlišení. Tato reprezentace je aplikovatelná globálně okolo sféry, umožňuje integrovat model terénu a prostorové objekty k němu vztažené a podporuje víceúrovňové rozlišení jak terénu, tak i těchto objektů.

Řešení víceúrovňové reprezentace objektů vychází z konceptu "otisku" geometrie modelu objektu na model terénu, tedy geometrie obrysu jejich prostorového průniku. Využití tohoto přístupu umožňuje vyhnout se strukturální složitosti ryzích 3D řešení, avšak současně umožňuje integraci s modely vytvořenými plně ve 3D (objemovými modely) tehdy, kdy se takovému řešení nelze vyhnout. Tato práce rozšiřuje existující přístupy, využívající tento koncept, poskytnutím podpory pro víceměřítkovou reprezentaci otisku. Součástí řešení je i metoda validace geometrie a vybraných atributů geoprvků.

Práce dále navrhuje algoritmus pro zjednodušování geometrie vstupní množiny obrysů. Algoritmus vytváří databázi geometrií pro různé úrovně detailu. Charakter výsledné databáze je takový, že grafická scéna rekonstruovaná na základě této databáze zachovává topologické vztahy mezi objekty. To je zajištěno na všech úrovních rozlišení, které jsou v takové scéně znázorněny, a to pro libovolnou pozici pozorovatele, pro kterou je databáze dotazována, a vůči které je scéna vykreslena.

Tato práce navrhuje dvě metody, které umožňují zohlednit při procesu generalizace objektů charakter okolního terénu. Nadto je popsán postup extrakce důležitých prvků terénu, které popisují jeho morfologii. Na příkladu takto získané strukturní sítě je ukázán postup, umožňující zachování důležitých prvků terénu na nižších úrovních detailu, tedy v částech scény se zjednodušenou geometrií.

Dizertační práce pro účely indexování prostoru a tvorby prostorové databáze adaptuje mechanismus pro globální indexování (GIG).

Životopis / Curriculum Vitae

Osobní údaje / Personal Information

Jméno / Name: Lukáš Brůha

Datum a místo narození / Date and Place of Birth: 28. 4. 1984, Klatovy (Czechia)

Vzdělání / Education:

Ph.D. studium / Kartografie, geoinformatika a DPZ, Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta (od 2008, zatím neukončeno)

Ph.D. study in Cartography, Geoinformatics and Remote Sensing, Charles University in Prague, Faculty of Science (since 2008, not finished yet)

Mgr. / Kartografie a geoinformatika, Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta (dokončeno 2008)

Master's degree in Cartography and Geoinformatics, Charles University in Prague, Faculty of Science (finished 2008)

Bc. / Geografie a kartografie, Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta (dokončeno 2006)

Bachelor's degree in Geography and Cartography, Charles University in Prague, Faculty of Science (finished 2006)

Zahraníční stáže / External research visit

2009 – 2010 Stáž na Aalborgské univerzitě (10 měsíců) / Internship at Aalborg university (10 months)

Výzkumné projekty / Research projects

TAČR TH01010586: INASAMP (2015–2017) – člen týmu / team member
zpracování dat LLS / ALS data processing

NAKI DF11P010VV003: TEMAP (2011–2015) – člen týmu / team member
*vývoj software pro správu a on-line prezentaci kartografických dokumentů/
software development for data management and on-line presentation of
cartographic documents*

Použitá literatura / References

- Ben-Moshe, B., Katz, M. J., Mitchell, S.B. and Y. Nir. Visibility preserving terrain simplification- an experimental study. *Computational Geometry*. 2004, vol. 28, iss. 2–3 pp. 175 - 190. Special Issue on the 18th Annual Symposium on Computational Geometry - SoCG2002.
- Boissonnat, J., Devillers, O., Teillaud, M. and M. Yvinec. Triangulations in CGAL. In *Proc. 16th Annu. ACM Sympos. Comput. Geom.* 2000, pp. 11–18.
- Dyken, C., Daehlen, M. and T. Sevaldrud. Simultaneous curve simplification. *Journal of Geographical Systems*. 2009, vol. 11, iss. 3, pp. 273-289.
- Garland, M. and P. Heckbert. Fast polygonal approximation of terrain and height fields. Technical report, Carnegie Mellon University, 1995.
- Goodchild, M. F., Yuan, M. and T. J. Cova. Towards a general theory of geographic representation in GIS. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.* 2007, vol. 21, iss. 3, pp.239–260.
- Gröger, G. and L. Plümer. How to get 3-D for the price of 2-D topology and consistency of 3-D urban GIS. *GeoInformatica*. 2005, vol 9, iss. 2, pp. 139-158.
- Guercke, R., Gotzelmann, T., Brenner, C. and M. Sester. Aggregation of LOD 1 building models as an optimization problem. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2011, vol. 66, pp. 209–222.
- Kallmann, M., Bieri, H. and D. Thalmann. Fully dynamic constrained delaunay triangulations. In *Geometric modeling for scientific visualization*. Springer, 2004, pp. 241–257.
- Kolář, J. Global indexing of topographic surface for 3D visualization and analysis. Thesis (PhD), 2006. Aalborg University, DK.
- Kulik, L., Duckham, M. and M. Egenhofer. Ontology-driven map generalization. *Journal of visual languages and computing*. 2005, vol. 16, pp. 245-267.
- Ledoux, H. and M. Meijers. Topologically consistent 3D city models obtained by extrusion. *International Journal of Geographical Information Science*. 2011, vol. 25, iss. 4, pp. 554-557.
- Meijers, M. Simultaneous & topologically-safe line simplification for a variable-scale planar partition. In: S.C.M. Geertman et. al.(eds) *LNGC: Advancing Geoinformation Science for a Changing World*, Springer Verlag, 2011. pp. 337-358.
- Penninga, F. Towards 3D topography using a feature-based integrated TIN/TEN model. In: *AGILE 2005, 8th Conference on Geographic Information Science*. Conference Proceedings. Estoril, Portugal, May 26-28, F. Toppen and M. Painho, Eds. 2005, pp. 243-257.
- van Oosterom, P. Variable-scale topological data structures suitable for progressive data transfer: The gap-face tree and gap-edge forest. *Cartography and Geographic Information Science*. 2005, vol. 32, pp. 331-346.
- van Oosterom, P., Meijers, M., Stoter, J. and R. Šuba. *Abstracting Geographic Information in a Data Rich World*, Chapter Data Structures for Continuous Generalisation: tGAP and SSC. Springer International Publishing Switzerland, 2014.

Introduction

Advances in data acquisition techniques have made huge geometric datasets ubiquitous in terrain modeling (Light Detection And Ranging (LiDAR), synthetic aperture radar), computer-aided engineering (laser short-range scanning) or vector topographic data (OpenStreetMap project). These datasets provide nearly a global coverage for applications within the field of geographic information science (GISc). There is an enormous number of spatial data sources, which differ in dimensionality, spatial coverage, resolution, accuracy and many other factors, including the data format, they stored in.

The topographic surface is central to this study. In the 3D space, it possesses a unique role. It provides the global defining surface in terms of which other features can be geographically referenced (georeferenced).

Many state-of-the-art representations of topographic surface provided graphical, 3D model of entire planet. However, the existing solutions to 3D representation of topographic surface lack the geometric flexibility and accuracy on boundaries with models of other geographic features.

Most of contemporary approaches to digital Earth solutions focus on the visualization performance. The high visual performance is achieved by the use of special data structures optimized for rendering. However, this optimization towards visualization hampers the data management of spatial data, their analysis and distribution.

The existing solutions lack geometric flexibility on boundaries with models of any other geographic features, which are connected to the terrain's surface. The precise representation of such boundaries on the surface is critical for many analytical applications and engineering domains.

Even regarding storage, maintenance and distribution, existing approaches to global solutions imitate the concept of scale series of traditional maps (e. g. 1:10 000, 1:25 000, 1:50 000, etc.) to achieve multiple levels of detail (LOD) of spatial objects. For each level, distinct representation is needed, stored and maintained.

In the traditional 2D domain, especially for purposes of national mapping agencies, solutions to this inconsistency appeared in a form of multi-representation databases or variable-scale geoinformation kept in structures like tGAP. It is however achieved at the cost of employment complex data structures. Problem with these structures is that they are difficult to be maintained.

Furthermore, the topological relations between geometrical objects, they store, were proven as an important restriction for multi-resolution visualization.

The storage of topological information further increases the vast data volumes to be handled within the digital Earth system, which easily exceed the usual capacity of data memory available at one site. Together with the fact,

that spatial information are more and more used in a network centric environment, the need for distributed solution and techniques, that support it, is apparent. And, the topology is particularly difficult to deal with in a distributed manner.

The data management issues also manifest themselves in the need for an indexing mechanism that addresses the topographic surface in all directions in a uniform matter. Therefore, the traditional flat approximation of Earth's shape should be avoided to eliminate geometric distortions and singular points.

Aims of the study

Currently, there is an open research question on how to address data management of various kinds of spatial features along with the underlying terrain for the sake of visualization and analysis. Therefore, the overall aim is to provide such theoretical framework for features on multiple LODs, that would enhance a multi-resolution representation bare Earth.

Considering the drawbacks of current solutions and the observation on the key role of the topographic surface, the main question to be answered in this thesis is:

How can we realize the global feature-based topographic surface with support for the position-dependent level-of-detail?

There are several partial questions, whose resolution leads to the overall aim.

To build a theoretical background of the proposed method, the first and second questions need to be answered:

1. What indexing and paging data structure should be adopted, so as to simultaneously support the multiple LOD and fulfil the preference for non-projected solution?

2. How can be formally described what multiple LOD environment is?

In order to introduce such a methodological framework, which would grant maximum flexibility, functional extensibility and general applicability, we bring into question:

3. How to design a conceptual data model that describes the feature-based topography in the multiple LOD environment?

To simplify the preconditions and to facilitate addition of independent features, the validation of data input comes into question:

4. How can be the valid input data created by as much automatic manner as possible?

horského hřbetu silnicí, přestože originální průběh hřbet obchází), což by v důsledku způsobilo i nežádoucí vizuální artefakty v grafické scéně. Metoda pro extrakci hřbetnic poskytuje horší odhad průběhu v okamžiku, kdy údolí či hřbet mají oblý charakter, přestože se může jednat o výrazný terénní útvar, ve srovnání se situací s ostrým zakončením.

Experiment využití hřbetnic též ukázal na schopnost systému zlepšit aproximaci terénu na nižších úrovních detailu přidáním vrstvy hřbetnic. Analýza viditelnosti byla provedena nad dvěma víceměřítkovými topografickými povrchy pro srovnání scénářů "bez", resp. "s" přidanými hřbetnicemi. Experiment potvrdil možnost zvýšení kvality aproximace za běhu programu, ale i vhodnost navržené reprezentace pro prostorovou analýzu.

Závěry

Dizertační práce představila procedurální datovou reprezentaci topografického povrchu s využitím geoprvků, která je globálně aplikovatelná a podporuje pozičně závislý LOD.

Předložené řešení vyhovuje specifickým požadavkům geoinformačních systémů s globálním pokrytím. Kromě požadavku na rychlost vizualizace se práce zaměřila na interoperabilitu dat, vhodnost datové reprezentace pro prostorovou analýzu, správu a distribuci dat i podporu více úrovním geometrického detailu.

Dizertační práce:

- formalizovala koncept geometrie obrysu geoprvcu ve víceměřítkovém prostředí
- ukázala, jak lze získat validní vstupní data pro generalizaci geometrie obrysů geoprvků
- navrhla topologicky korektní metodu zjednodušování geometrie množiny obrysů geoprvků pro víceměřítkovém prostředí
- definovala primární geometrickou strukturu otisku pro jeho reprezentaci na různých úrovních detailu a ukázala, že spolu s procedurální charakterem rekonstrukce topografického povrchu je možné se vyhnout redundanci v uložení dat
- představila dvě metody pro řízení průběhu generalizace geoprvků s ohledem na tvar okolního terénu
- a ukázala, jak zachovat významné morfologické prvky terénu v částech zobrazených s nižší úrovní detailu.

rozšířena o schopnost zjednodušení geometrie pro prostředí s více úrovněmi detailu.

Funkčnost konceptu víceměřítkového topografického povrchu s geoprvky byla ověřena vytvořením víceměřítkové databáze, a to v několika variantách.

Následující scénáře byly otestovány:

- různé vstupní vrstvy (silnice, budovy, hřbetnice, teréní data) a v různých kombinacích byly použity pro vytvoření databáze
- databáze byly vytvářeny s několika variantami prahů, které definují maximální míru zjednodušení geometrie
- funkce pro přiřazování vah jednotlivým bodům, podle nichž se proces zjednodušování řídí, byly pro vybrané vrstvy upraveny tak, aby zohlednily jejich roli v systému a sémantický význam
- byly vytvořeny databáze se systémem dvou, resp. tří LOD.

Výstup z experimentální implementace nad CGAL má podobu textových souborů, které nejsou vhodné pro trvalé uložení v distribuovaném prostředí. Z tohoto důvodu byla data importována do databázové platformy PostgreSQL.

Procedurální reprezentace topografického povrchu. Primární geometrická struktura, která nese geometrii obrysu geoprvcu vždy pro daný LOD, byla navržena s ohledem na způsob rekonstrukce povrchu (procedurálně za pomoci Delaunay triangulace). Díky tomu bylo možné se zcela vyhnout redundanci ukládaných dat. Uložena je pouze původní geometrie, není nutné její opakované ukládání na více LOD (nebo jejích částí), není potřeba ukládat ani pomocné struktury pro uložení informací o topologii či geometrických vztazích geoprvcu mezi různými LOD.

Pro vyhodnocení tohoto přístupu byla implementována Java aplikace pro kontrolu běhu programu, která v sobě obsahuje i metodu rekonstrukce geometrie geoprvků. Převzata byla její 3D grafickou komponenta. Aplikace podporuje paralelizované zpracování dat.

Bylo provedeno testování výkonnosti jednotlivých částí aplikace, které odpovídají navrženým algoritmům.

Rekonstrukce povrchu za běhu programu na základě dat z víceměřítkové databáze ukázala funkčnost konceptu, přestože provedená implementace není produkčním řešením, ale pouze experimentálním, a přestože implementace nebyla optimalizována na výkon.

Analýza morfologie terénu a její aplikace. Práce navrhla metodu extrakce důležitých prvků morfologie terénu. Postup je založen na analýze LiDARových dat s využitím prvotní aproximace hledané zlomové hrany. Metoda rozšířila existující řešení z pohledu nezávislosti procedury na přesnosti prvotní aproximace. Implementace využívá knihovnu ArcPy a její hlavní část byla provedena v rámci diplomové práce, kterou autor vedl. Metoda poskytuje přijatelné výsledky pro účel, který v této práci má. Tedy zabránit nevhodným generalizacím geoprvků, které by vážně zasáhly do struktury terénu (protnutí

Afterwards, a method for features' geometry decimation becomes an issue for further consideration:

5. How can be the database of features created so that the topological relations between features will be preserved in the multiple LOD environment reconstructed on its grounds?

Having the database of features and underlying bare Earth model:

6. How can be the topographic surface with features synthesized for given observer position?

The fifth question, that covers the topological relations between features, can be extended to cover relations between the geometry of terrain and the geometry of features:

7. How to guide the simplification of features with regard to terrain?

With respect to the data representation of bare Earth to be adopted in this work, for a plenty of GIS applications, the ability to decrease the rate of simplification or even maintain the full resolution of distinct terrain structure, is important:

8. How to preserve selected morphological characteristics of terrain on coarser levels of detail?

The thesis addresses the research questions within several thematic units.

In the third chapter, the arguments for three fundamental choices for the character of the solution are built, namely the preference for minimal data redundancy, the preference for procedural solution and the preference for non-projected solution.

Based on the preferences, the indexing mechanism with support for LOD and the bare Earth representation, which are adopted by the method of this work, are formalized.

The fourth chapter introduces the concept of footprint and its multi-resolution representation, in order to provide means for population of topographic surface with any geographic features that can influence its shape. Method, for analysis of footprints to ensure initial data validation and adjustment, is proposed. The simultaneous simplification algorithm is presented as well as the method for the reconstruction of the topographic surface. The surface reconstructed at run-time contains topologically consistent approximations of features for arbitrary position of an observer, with the intensity of geometry simplification growing with the distance from the observer. The proposed solution does not introduce any data redundancy.

The fifth chapter explores the relation between geometry of spatial objects and the geometry of bare Earth in the multiple LOD environment. The solution from previous chapter is extended in two ways. The enhancement of the simplification algorithm, which allows to restrain the simplification of features with respect to the geometry of terrain, is introduced. Furthermore, the

method, which allows for preservation of terrain morphological structure on coarser LODs is described. The consequences of the procedural approach on visualization and spatial analysis are discussed.

Methods

The section on methods will be described in thematic units that correspond to the text in the thesis.

The concept of multi-resolution footprint. The footprint is defined here as the outline of the geometry resulting from the intersection between the Delaunay triangulation of topographic surface and the 3D geometry of the feature. To address the multi-resolution properties of footprints, the formal definition of footprint takes into account the importance of different parts of footprints. Every point of the constituting geometry is assigned a weight. Consequently, the primary geometric structure for footprint's representation is defined as a record, which holds the footprints' geometry relevant only to required level of detail (LOD).

The exploitation of the concept of footprint allowed to populate the bare Earth model with any geographic feature, which can influence its shape. Conceptually, footprint alleviates from the structural complexity of pure 3D solutions, but it also supports the extension to true 3D, when needed. It can be achieved via integration of the 2.5D terrain with independently modeled 3D objects, where the footprint has a role of the geometric interface.

Footprint analysis. An automated method for processing and analysis of input footprints, their validation and adjustment was proposed. The need for such a method is driven by the relative independence of features, allowed by the solution, due to which geometrical and topological inconsistencies may occur.

From geometrical point of view, the proposed method for footprint analysis handles the degenerations such as edge overlapping, self-intersections or duplicated points, and automatically fixes them. The attribute part, namely the weights of points, are adjusted as well. This adjustment takes into consideration the neighbouring spatial objects and the weights of their geometries.

Weights' adjustment with respect to other features is a necessary step, in order to preserve the mutual topology between the footprints in the multiple LOD environment. The adjustment of weights is driven by the system of rules defined in the work. The analysis of weights is done prior to simplification of any points for a coarser LOD according to the rules.

Creation of multiple LOD database. In order to assign the subsets of the original constituent geometry of footprints to a distinct LOD, the simultaneous simplification algorithm was designed.

topografického povrchu za běhu programu zlepšilo aproximaci terénu v částech scény s nižším LOD.

Výsledky & diskuze

Geoinformační systémy s globálním pokrytím jsou poměrně novou technologií. Přístupy z řady výzkumných směrů se prolínají v návrhu řešení takovéto platformy, která má představovat univerzální nástroj pro sdílení různých typů prostorových dat různého původu.

Analýza obrysu geoprvcu. Během návrhu datové reprezentace topografického povrchu s geoprvcy se ukázalo, že stávající metody generalizace vektorových dat pracují s poměrně striktními předpoklady na charakter vstupu. Pro zjednodušení těchto předpokladů a umožnění přidávání nezávisle vytvářených modelů prostorových objektů, byla navržena a implementována metoda jejich analýzy.

Při implementaci byla využita robustní knihovna CGAL, která je známá vysokou efektivitou implementovaných algoritmů. Tyto vlastnosti jsou vhodné pro velké datové sady, se kterými pracuje předkládané řešení. Pro experimentální vyhodnocení byla zvolena datová sada OpenStreetMap, zejména pro její téměř globální rozsah. Oblast testovaná během experimentu odpovídala přibližně severovýchodní části Čech. V této oblasti byly provedeny i další experimenty.

Analýza odhalila existenci topologických rozporů se specifikací OSM. Ačkoliv problém validace je teoreticky poměrně jednoduchý a automatická oprava chyb je obtížnější.

K řešení neuzavřených polygonů byl zvolen přístup, který využívá triangulaci implementovanou v CGAL, která zajišťovala i topologickou správnost v algoritmu simplifikace geometrie geoprvců. Další výhodou toho přístupu je automatické řešení situací, jako jsou polygony s dírou a geometrie s nespojenými částmi, v rámci triangulací, tudíž nejsou potřeba žádné pomocné struktury či mechanismy.

Víceměřítková databáze. Za účelem zařazení geometrie na daný LOD byla navržena a implementována metoda simplifikace, která současně zpracovává celou vstupní množinu geometrií a zachovává topologické vztahy. Prezentovaný algoritmus je ve spolupráci se zmíněnou analýzou vstupu aplikovatelný na libovolnou množinu obrysů. Hlavní rozšíření oproti existujícím přístupům spočívá ve schopnosti topologicky korektní generalizace pro víceměřítkové prostředí. V důsledku tedy umožňuje vytvořit geometrii obrysů s proměnou úrovní detailu podél jejich průběhu.

Implementace metody využila stávající řešení CGAL ve smyslu detekce topologických konfliktů způsobených jednotlivými kroky zjednodušování geometrie, resp. jejich zabránění. Implementace v knihovně CGAL byla

Vytvoření víceměřítkové databáze geoprvků. Pro účely přiřazení jednotlivých bodů utvářejících geometrii obrysu do různých LOD byl navržen algoritmus, který současně zjednodušuje celou vstupní množinu geometrií a zachovává topologické vztahy.

Neboť Delaunay triangulace je základem řešení pro rekonstrukci topografického povrchu za běhu programu, je využita i pro testování vztahů v sousedství objektů tak, aby bylo vyloučeno vytvoření topologických chyb.

Klíčové pro zachování těchto vztahů v definovaném víceměřítkovém prostředí (tedy takovém prostředí, kde se geometrický detail snižuje s rostoucí vzdáleností od pozorovatele v souladu s použitou indexovací strukturou) je rozlišení dvou druhů bodů, které mohou blokovat daný krok simplifikace. Prvním typem jsou ty body, které leží ve stejné buňce použitého indexu. Druhým pak ty, které se nacházejí v sousedních buňkách. Mechanismus indexování je proto zásadní pro formalizaci metody generalizace.

Dizertační práce pro účely indexování prostoru a tvorby prostorové databáze adaptuje mechanismus pro globální indexování (GIG). Koncept buňky GIG je klíčový, neboť na jeho základě je definováno prostředí s více LOD. GIG buňka představuje Voronoi diagram na sféře. S těmito buňkami na různých LOD je asociována geometrie geoprvků odpovídající LOD buňky.

Na základě této metody indexace je možné pro libovolnou pozici pozorovatele ve 3D virtuální scéně definovat úroveň rozlišení aktuálně viditelných objektů a terénu. Dizertační práce definuje vlastní metodu rekonstrukce geometrie obrysů geoprvků za běhu programu. Rekonstrukce vždy pracuje pouze s tou geometrií, která byla získána z víceměřítkové databáze na základě GIG dotazu na danou pozici pozorovatele. Výsledný topografický povrch s geoprvkou je rekonstruován pomocí Delaunay triangulace s omezujícími podmínkami (rekonstruovanými obrysy).

V této části práce jsou též detailně diskutovány vlastnosti rekonstrukce povrchu zejména na hranicích mezi úrovněmi LOD.

Generalizace geoprvků s ohledem na terén. Druhá metodologická část práce řeší vztah geometrií geoprvků a terénu při průběhu generalizace geoprvků. Za tímto účelem byly navrženy dva postupy.

První je představován návrhem jednoduchých a výpočetně efektivních kritérií pro vyhodnocení důležitosti topologické změny mezi zjednodušovanými geoprvkou a geometrií terénu. Využívá přitom lokálního charakteru trojúhelníkové sítě, kterou aplikovala i metoda simplifikace pro detekci potenciálních topologických konfliktů mezi geoprvkou.

Druhá prezentovaná metoda umožňuje omezit generalizaci s ohledem pouze na vybrané morfologické prvky terénu. Byl též představen postup extrakce takových prvků. Zahrnutí těchto prvků do rekonstruovaného

This "en mass" solution modifies the complete set of poly-lines simultaneously, while respecting and preserving their topological relationships.

Since Delaunay triangulation is the basic concept of reconstruction of the proposed topographic surface, it is employed for testing of relationships between poly-lines, so as to avoid introduction of topological errors caused by a point removal.

The key to the topological preservation in the multiple LOD environment (for the footprint geometry it can be understood as a "mixed-scale" representation, whose detail decreases with increasing distance from the observer accordingly to the applied indexing structure) is rooted in the distinction and different handling of two of neighbouring footprints, which can restrict the simplification of geometry. First, distinct vertices of footprint's geometry that lie within the processed cell of employed spatial index. Second, those vertices that lie in the neighbouring cells. The mechanism of data management of multiple LOD is fundamental for formalization of the method. Important is the concept of Global Indexing Grid (GIG) cell, which, basically, is the Voronoi diagram on the sphere. GIG cells were used to delimit the partitions of space that correspond to multiple LOD.

Synthesis. At run-time, the reconstruction of feature-based topographic surface is based on the query on observer position, which returns only the target GIG cells on multiple levels with associated geometry.

When a paging mechanism is associated with the viewer's position, it provides records from relevant GIG cells at multiple LODs. The paging mechanism can utilize several types of GIG queries. The algorithm for reconstruction of the multi-resolution footprint for given position of observer, was proposed.

The cases of topological validity including the non-trivial cases on the boundaries between resolutions are discussed in detail.

Terrain-aware generalization of features. The second methodological part of the thesis looks into the relations between geometry of footprints and geometry of bare Earth on multiple LODs.

Simple and fast criteria for an evaluation of the importance of topological change between feature to be simplified and the geometry of terrain, were proposed. In order to determine the cost of a footprint's point removal, which results in a new edge segment, the locality of the triangle structure was exploited.

The maximum distance criterion, the root mean square of the orthogonal distances between terrain points in the concerned territory, and the volumetric criterion were defined. The extension, which incorporates these criteria into the simultaneous simplification algorithm was presented.

The second presented method that allows to guide the simplification of footprints with respect to important features of terrain, is rooted in the addition of features representing terrain morphology into the process of multiple LOD database creation.

It was presented, that thanks to the character proposed simplification algorithm, terrain features prevents from undesirable simplifications of other footprints. Moreover, the addition of terrain features enhances the approximation of the terrain on coarser LODs.

Results & discussion

The geo-spatial information systems with global coverage, like the digital Earth, are relatively new technologies. The approaches from multiple research domains meet in the design of such a platform for sharing of spatial data.

Initial analysis and processing. The main result of this section is the proposal and implementation of footprint analysis procedure.

It deals with possible geometrical inconsistencies by keeping track of intersecting and overlapping poly-lines.

Moreover, the introduced analysis of footprints provides means for processing the attributes of spatial objects, which encodes the required behaviour or functionality of the object in the system and during its interaction with other objects. This was manifested through the example of weights that mark the importance of the constituting geometries of object's footprint. The analysis of footprint enables the adjustment of such weights. The outcome of such adjustment depends on what objects enter the analysis. Such analysis guarantee, that afterwards such objects will act in the system in mutual respect, e.g. the original common boundaries of the objects will remain common on coarser LODs.

For the experimental evaluation, the OpenStreetMap (OSM) data were chosen, particularly due to their nearly global spatial coverage. The selected area for the sake of experiment covered the north-eastern part of Bohemia, where all the other experiments were carried out.

In the implementation, we relied on the CGAL libraries, as they provide highly efficient implementation of computational geometry algorithms, which is suitable for processing of large datasets.

Relatively small number of topological exceptions from the stated specification of the OSM data was detected. Although the problem of validating the input data is theoretically simple and boils down to validation of the defined set of geometrical rules, the implementation of tools for automatic repair is far from being trivial.

The solution to the unclosed polygons was achieved through employment of the triangulation library of CGAL. It is quite elegant approach, because the triangulation is, in the presented solution, the tool that guarantees the

2. Formalizace mechanismu členění prostoru do různých úrovní detailu.
3. Návrh datového modelu pro popis topografického povrchu s podporou geoprvků v prostředí s LOD.
4. Návrh postupu analýzy vstupních dat a automatizace jejich validování.
5. Návrh postupu tvorby databáze geoprvků, který garantuje zachování topologických vztahů mezi geoprvkou v prostředí s mnohočetným LOD, jehož výsledná geometrie je konstruována na základě takové databáze.
6. Návrh postupu rekonstrukce topografického povrchu s geoprvkou pro danou pozici pozorovatele.
7. Návrh postupu zjednodušování geometrie geoprvků při tvorbě víceměřítkové databáze, který bude zohledňovat geometrii modelu okolního terénu.
8. Návrh postupu, který umožní zachovat vybrané prvky morfologické struktury terénu na nižších úrovních detailu.

Metody & data

Následující text je členěn do tematických celků, které odpovídají členění samotné práce, a stručně shrnuje navržené přístupy.

Koncept víceměřítkového obrysu geoprvků. Obrys je definován jako geometrie průniku mezi Delaunay triangulací rekonstruovaného povrchu a 3D geometrií geoprvků. Definice obrysu zahrnuje systém vah, které jsou přiřazeny jednotlivým bodům obrysu tak, aby byla rozlišena jejich důležitost. Primární geometrická struktura pro reprezentaci obrysu na více úrovních detailu je definována jako záznam, který nese určenou podmnožinu původní geometrie vztaženou k danému LOD. Definovaná struktura záznamu zajišťuje korektní rekonstrukci za běhu programu.

Využití takového konceptu umožňuje rozšířit model terénu o libovolný geoprvek, který ovlivňuje tvar terénu. Nadto se lze vyhnout strukturální složitosti ryzích 3D řešení. Současně je však možné provést integraci s modely vytvořenými plně ve 3D (objemovými modely) tehdy, kdy se takovému řešení vyhnout nelze.

Obrys tak má roli geometrického rozhraní mezi geoprvkou navzájem a mezi geoprvkem a terénem, díky kterému je umožněna integrace 2.5D modelu terénu a nezávisle modelovaných 3D objektů.

Analýza obrysu geoprvků. Práce představila automatizovanou metodu analýzy vstupních obrysů, validace jejich geometrii a atributů. Z geometrického pohledu metoda řeší jevy jako překrývající se hrany, průniky hran mimo vrcholy nebo duplicitní body. Atributová část analýzy zajišťuje vzájemné přizpůsobení vah geoprvků v závislosti na dalších objektech vstupujících do analýzy. Je definován systém pravidel pro přizpůsobení vah. Jejich dodržení je nutným předpokladem pro zachování vzájemné topologie mezi objekty (společné hranice apod.) na nižších úrovních detailu.

Úvod

Rozvoj nových technologií pro pořizování prostorových dat značně rozšířil množství i dostupnost objemných geometrických dat pro modelování povrchu. Tyto datové sady mají téměř globální pokrytí využitelné pro aplikace v oblasti geoinformačních systémů. Existuje enormní množství datových zdrojů, které se liší prostorovým pokrytím, dimenzionalitou, rozlišením, přesností a řadou dalších faktorů včetně datového formátu pro jejich uložení.

Geoprvky modelované ve 3D na základě takovýchto zdrojů dat mají jedno společné, a to je vztah k topografickému povrchu, vůči němuž jsou referencovány.

Řada reprezentací topografického povrchu poskytla grafický model celé planety ve 3D. Tato řešení se zaměřují zejména na vysoký výkon vizualizace. Tato optimalizace však omezuje interoperabilitu dat, správu dat a jejich distribuci i analýzu dat. Existující 3D řešení nadto postrádají geometrickou flexibilitu a přesnost na hranicích s modely jiných geografických objektů. Přesná reprezentace těchto hranic na topografickém povrchu je přitom klíčová pro řadu analytických aplikací.

Také v oblasti uložení, údržby a distribuce, existující přístupy ke globálním aplikacím imitují poslovnosti měřítek tradičních map k vytvoření různých úrovní detailu (LOD) objektů. Často tak dochází k uchovávaní jednotlivých datových modelů pro každou LOD.

Nejnovější přístupy, zejména pro účely národních mapových agentur, směřují k odstranění tohoto nedostatku. Příkladem mohou být víceměřítkové databáze nebo hierarchické struktury jako je tGAP. Zásadní problémy těchto řešení spočívají v obtížné editaci těchto komplexních datových struktur, uchovávaní topologie, které zvyšuje již tak obrovské datové objemy, které je potřeba ukládat a současně ztěžuje jejich distribuované uložení.

Cíle práce

Hlavním cílem práce je návrh víceměřítkové datové reprezentace topografického povrchu založené na geoprvcích. V současné době je otevřeným výzkumným problémem nalezení takového řešení, které by

- na různých úrovních geometrického detailu umožnilo správu geometrie modelů prostorových objektů v souladu s modelem terénu a jejich vzájemnou integraci
- kromě efektivní vizualizace bylo vhodné pro i prostorovou analýzu a distribuci dat.

Lze definovat následující dílčí cíle, jejichž vyřešení vede k celkovému cíli.

1. Nalezení vhodné struktury pro prostorové indexování, která disponuje podporou pro více úrovní geometrického detailu geoprvků a současně umožňuje vyhnout se projekcím prostorových dat.

prevention from the topological errors caused by poly-line simplification. The polygon closing is guaranteed by the triangulation library. Another advantage of this approach is, that the potential holes/islands inside polygons are easily handled by the triangulation library, with no other auxiliary data structure or special mechanisms needed. Several inappropriate overlays of buildings' footprints were removed manually.

Multi-resolution database of features. The concept of footprints was extended, so as to be applicable in the multi-resolution environment. For this purposes, the primary geometric structure of the footprint and the geometry simplification algorithm were proposed.

The record of footprint always holds a subset of points of the original footprint's representation, which is relevant only to a given LOD. It is upon the generalization algorithm to determine the subset of points for the record associated with each LOD. This algorithm is a main achievement in this section.

In order to assign the constituent points to a distinct LOD, the simultaneous simplification algorithm was designed and implemented. Presented algorithm, in contradistinction to existing solutions, is not limited to a connected graph. Together with the adjustment of weights introduced in the procedure for footprint analysis, the presented approach is applicable to an arbitrary set of poly-lines.

The main improvement over existing simplification methods lies in the ability to produce topologically consistent geometry for an environment (graphic scene), which consists of multiple LODs.

For the sake of implementation of the geometry simplification method, which is the core of our approach to the creation of multiple LOD database of features, we got back to the CGAL library. On top of the CGAL's poly-line simplification solution, we implemented an extension for multiple-resolution database creation, which corresponds to the proposed simplification algorithm.

The functionality of the multi-resolution concept of topographic surface with features was verified by means of the created multi-resolution database. Multiple scenarios were tested:

- various input feature layers and their combinations were used as an input to the multiple LOD database creation,
- the database was created with the use of different stop criteria to the simplification,
- the adjustments of cost functions of selected layers were tested, in order to consider different semantics among layer,
- multi-resolution databases with two as well as three LODs were provided.

The simplest mean of long term data persistence, namely the I/O files storage resulting from the CGAL processing, is not suitable for the solution, that is

intended for the distributed environment and client/server applications, or even enterprise-level storage. Therefore, the PostgreSQL database platform was used as a third party technology for the storage of the data.

Procedural topographic surface. The procedural aspect of the solution presented across this work introduced another shift of current approaches. This shift is rooted in the procedural character of the topographic surface reconstruction, which the primary geometric structure was tailored to.

The primary geometric structure in this work was designed for the procedural way of topographic surface reconstruction. Consequently, the redundancy in data storage was entirely avoided.

The procedure for run-time reconstruction of poly-line's geometry relevant only to given query on observer's position was proposed and implemented. As a consequence, an effective construction of the footprint-enhanced topographic surface with multiple LOD can be synthesized for a neighborhood of observer's position.

When this position is associated with the viewer's position, the paging mechanism is obtained, which always provides data for a relevant neighborhood at multiple LODs.

This supports data access but also visualization for possibly huge databases, which cannot be entirely loaded into memory and visualized, which can reside on a network, can be distributed, and/or decentralized.

To evaluate the functionality of the concept, the run-time control application, which includes the implementation of the feature-enhanced surface reconstruction and adopted viewer component, are presented.

It is rooted in the Java-based application. It has a character of a processing pipeline, which controls the course of the data synthesis. It utilizes the Apache Commons component *Pipeline*, which objective is to provide a set of utilities for parallelized data processing and several multithreaded processing models.

The pipelines allow the data objects to be processed by a series of *Stages*, which are the primary unit of execution in a processing pipeline. They act as an independent user-defined components, the threading model of each stage is independent on the threading model of the other stages. The reusability of stages in other pipelines is another advantage.

The scene of multi-resolution topographic surface was reconstructed at run-time and several performance statistics were provided. They showed the feasibility of the solution, despite the fact, the implementation is not production-ready and its performance is not optimized.

Terrain morphology analysis and application. The method for extraction of valley-lines and ridge-lines was proposed and implemented. It is rooted in the point cloud analysis, which uses the primal approximation of the searched terrain break-line. The existing solutions were enhanced especially in terms of the independence on the primal approximation accuracy. This was achieved

through the iterative method, which acts adaptively to the accuracy of primal approximation and takes into consideration the shape of surrounding terrain. The implementation utilized ArcPy libraries and was mostly achieved within the project related to the master thesis, the author supervised.

Briefly, the method for extraction of terrain features worked well for detection of sharp break-lines (ridge lines, valley lines), but provided debatable results, when even significant elevation difference (deep valley, high mountain) has rounded ending (valley bottom, mountain ridge).

The retrieved ridge-lines served as an input to the test of two characteristics of the concept, proposed in this thesis. It was verified, that the insertion of the terrain feature (ridge-line) into the database creation process prevents from a topological dislocation, which could occur on coarser LODs between such a feature of the terrain and some other footprint.

By means of simple visibility test over two types of multi-resolution surfaces, the ability to enhance the quality of terrain approximations on coarser LODs on-demand was demonstrated, as well as the suitability of the concept for spatial analysis.

Conclusions

The presented work is the result of a long-lasting interest of the author in the digital Earth research domain. This work introduced a procedural data representation for the feature-based topographic surface, which is globally applicable and supports position-dependent level of detail.

The proposed solution reflects on multiple requirements of digital Earth systems. In addition to the visualization performance, the properties regarding data interoperability, data management and distribution, data analysis and the multiple LOD were considered as essential for the design of the geographic information system with the global coverage.

To briefly list the contributions, the thesis:

- formalized the concept of footprint in the multiple LOD environment,
- shown, how to obtain valid input data for the generalization of footprint's poly-lines,
- proposed simultaneous simplification of poly-lines for the multiple LOD environment, which is aware not to introduce topological errors,
- proposed the primary geometric structure for footprints on multiple LODs and shown, that when this representation is used in conjunction with procedural topographic surface, any redundancy in data storage can be avoided,
- presented two approaches to guide the generalization of features with respect to terrain,
- demonstrated, how to enhance the quality of terrain approximation on coarser LODs at run-time on-demand.