

KRAJINA NA DOTYK: NOVÉ FORMY VIZUALIZÁCIE A INTERAKCIE S GEOPRIESTOROVÝMI DÁTAMI

Jozef ŠUPINSKÝ, Michal GALLAY, Jaroslav HOFIERKA,
Jozef BOGLARSKÝ

Tangible landscape: new forms of visualization and geospatial data interaction

Abstract: The interest in new forms of visualization and interaction with geospatial data has grown in the last decade. While the display of virtual 3D models on screens lacks the sense of touch, integration of physical 3D models of the landscape and digital projection of geographical layers takes advantage of both visual and tactile perception. In this paper, we present a specific configuration of a geographic information system and physical 3D models termed a tangible landscape modeling system. We focus on the demonstration of its capabilities with models of a real urban landscape represented by a physical 3D model created by a 3D printer and scanned by the new Azure Kinect 3D scanner. The results show application in presenting the modelling of land surface temperature modeling in the city of Košice. Interaction with the system by the visitors and policy makers during a public event improved their understanding of the scientific content of the geospatial modelling in relation to the urban morphology and mitigation of consequences of climate change. The results show new possibilities of using the system for illustrative visualization and user interaction with geospatial data providing new tools for urban planning and management.

Keywords: Tangible Landscape, tangible user interfaces, land surface temperature, GRASS GIS

Úvod

Rozvoj informačných technológií priniesol aj nové formy používateľských rozhraní pre komunikáciu a interakciu s dátami. V oblasti geopriestorových technológií vznikla nová generácia dotykových používateľských rozhraní, ktorú je možné využívať na vizualizáciu a fyzickú interakciu s trojrozmernými (3D) modelmi krajiny (Marshall, 2007; Tonini et al., 2017; Petrasova et al., 2018; Millar et al., 2018; Barvir et al., 2021). Petrasova et al. (2018) vyvinuli dotykové používateľské rozhranie pre prostredie GRASS GIS, ktoré je geografickým informačným systémom (GIS) založenom na otvorenom zdrojovom kóde (GRASS Development Team, 2020; Mitasova et al., 2006; Neteler a Mitasova, 2008). Na rozdiel od pôvodnej verzie, je v súčasnosti aj cenovo dostupné riešenie vďaka využívaniu bežných spotrebiteľských technológií a bezplatného softvéru. Tento systém nazývame Krajina na dotyk (pôvodne v angličtine Tangible Landscape Modeling System, neskôr Tangible Landscape). Tvorí ho GIS softvér, senzor Microsoft Kinect pre 3D skenovanie fyzických modelov, cenovo dostupný dátový projektor pre farebné premietanie geopriestorových dát z prostredia GIS na fyzický model a materiál tvoriaci fyzický model.

Podobný systém založený na rozšírenej realite s kinetickým pieskom bol vyvinutý autormi Woods et al. (2016) pre vzdelávacie účely v geológii. Hofierka et al. (2022) predstavili aplikáciu tohto systému pri výučbe vybraných tém z geografie na základných školách. V mnohých prípadoch tieto systémy slúžia pre lepšie pochopenie topografických máp, napríklad konceptu vrstevníc

Mgr. Jozef ŠUPINSKÝ, PhD., doc. Mgr. Michal GALLAY, PhD., prof. Mgr. Jaroslav HOFIERKA, PhD., Mgr. Jozef BOGLARSKÝ, Ústav geografie, Prírodovedecká fakulta, Univerzita Pavla Jozefa Šafárika v Košiciach, Jesenná 5, 040 01 Košice, e-mail: jozef.supinsky@upjs.sk, michal.gallay@upjs.sk, jaroslav.hofierka@upjs.sk, jozef.boglarsky@student.upjs.sk

či foriem georeliéfu. Doterajšie aplikácie však zahŕňajú aj urbánne plánovanie, povrchový tok vody, šírenie lesných požiarov, protipovodňovú a protieróznú ochranu (Millar et al., 2018; Petrasova et al., 2018; Petrasova et al., 2020; Woods et al., 2016). Pôvodný systém Krajina na dotyk bol vyvinutý na báze 3D laserového skenera a plastelíny. Súčasnú riešenie využíva bežne dostupný 3D senzor Azure Kinect vyrábaný spoločnosťou Microsoft. Senzor umožňuje snímať pomerne širokú škálu materiálov, ako je piesok na báze polymérov, modely z 3D tlačne, či papierové, drevené alebo sadrokartónové architektonické modely.

Hlavnou výhodou tohto systému je možnosť realistickej 3D reprezentácie krajiny a možnosť fyzickej interakcie s modelom krajiny, pričom používateľ okrem zraku, prípadne sluchu zapája aj hmat. Koncept dvojrozmerných máp, kde trojrozmerná realita krajiny je premietnutá do roviny mapy spôsobuje mnohé problémy používateľom, ktorí nemajú dostatočne vyvinuté priestorové myslenie a predstavivosť. Taktiež pre ľudí s problémami so zrakom klasické mapy prinášajú viaceré obmedzenia, ktoré je možné prekonať vďaka technológii 3D tlačne a 3D modelom krajiny (Barvir et al., 2021). Systém Krajina na dotyk slúži aj na pochopenie dynamiky geopriestorových javov a procesov. Zmeny v priestorovom modeli krajiny vyvolané používateľom sa v reálnom čase skenujú, spracujú v GIS-e a premietajú na povrch modelu. To umožňuje lepšie pochopiť dôsledky ľudských zásahov do krajiny (zmena smeru orby, výstavba budovy) alebo lepšie pochopiť prírodné procesy (napr. tečenie vody, erózia). Prínosom je možnosť tímovej modifikácie 3D modelu a hodnotenia výsledkov, čo zvyšuje hodnotu systému z hľadiska tímovej spolupráce a rozhodovania. Doterajšie aplikácie systému Krajina na dotyk sa zameriavali najmä na oblasť geomorfológie v prírodnej či rurálnej krajine. Zastavané oblasti predstavujú zložitejšiu aplikáciu vzhľadom na zložitosť priestorovej štruktúry urbanizovanej krajiny. Avšak v súvislosti s nárastom dostupnosti virtuálnych 3D modelov krajiny sa otvára možnosť tvorby 3D modelov zastavaného územia ako produktov 3D tlačne. Zvyšujúca sa kvalita 3D tlačne umožňuje výrobu týchto modelov v kvalite, ktorá umožňuje reprezentáciu zastavaného územia vo vysokej miere priestorového rozlíšenia a zachytených geometrických detailov. Tým sa otvárajú aj nové možnosti aplikácie systému Krajiny na dotyk, napríklad v oblasti výskumu mestských ostrovov tepla či dynamiky povrchovej teploty zastavaných území.

Cieľom tohto príspevku je predstaviť technologické aspekty systému Krajina na dotyk v spojení s produktami 3D tlačne a na príklade urbanizovanej krajiny predstaviť možnosti vizualizácie a interakcie s geopriestorovými dátami na príklade mesta Košice.

1. Komponenty systému Krajina na dotyk

Systém Krajina na dotyk sa skladá zo štyroch hlavných súčastí: (a) fyzický model s materiálom manipulovateľným rukami alebo vytlačeným na 3D tlačni, (b) 3D skener na zachytenie povrchu fyzického modelu (c) projektor, ktorý premieta farbu z digitálneho modelu vypočítaného v GIS-e na povrch fyzického modelu (d) bežný počítač, napr. notebook s nainštalovaným softvérom GRASS GIS (GRASS Development Team, 2020).

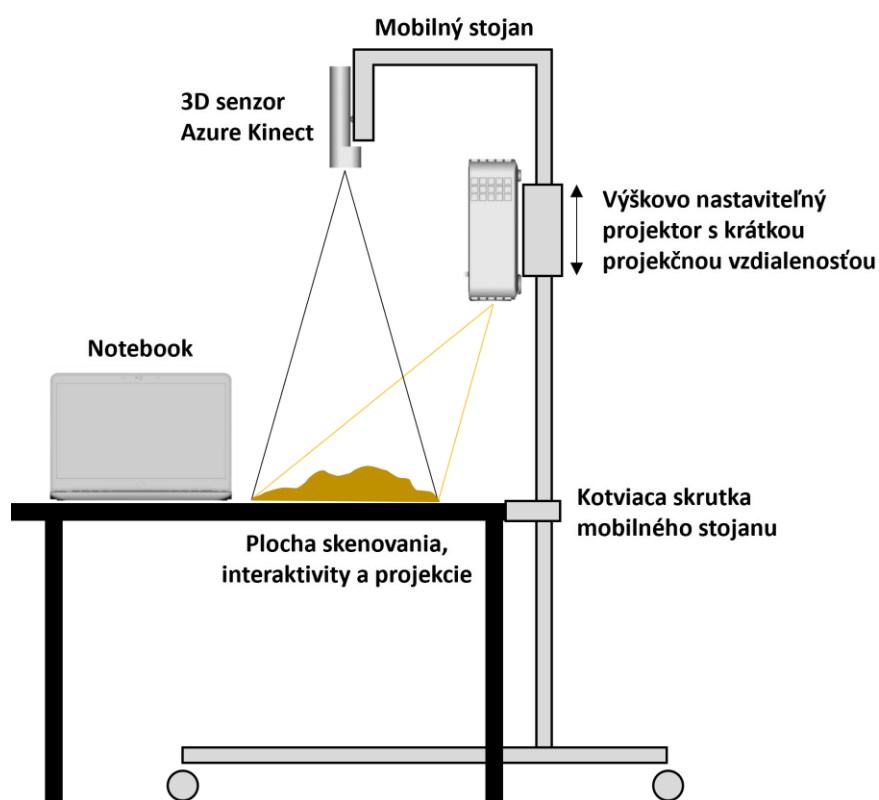
Fyzický model je voľne umiestnený na stole, skener a projektor sú upevnené na kovovej konštrukcii (obr. 1). Skener a projektor musia byť umiestnené tak, aby si navzájom neprekývali svoj operačný priestor, teda, aby si navzájom neprekývali výhľad a viditeľnosť fyzického modelu. Fyzický model krajiny, či už vytvorený z kinetického piesku alebo na 3D tlačni sa umiestňuje do dreveného rámu s typickou veľkosťou 40×40 cm, ktorá sa však môže zmeniť na rozmer 70×70 cm alebo aj viac v závislosti od konfigurácie systému zmenou výšky snímania skenera a použitého projektoru. Model sa umiestňuje na stôl, ktorý musí mať o niečo väčšie rozmery tak, aby osoby mohli ľahko manipulovať s fyzickým modelom a zároveň mohli využívať doplnkový priestor okolo rámu pre ďalšie nástroje alebo ovládacie prvky softvéru.

Povrch fyzického modelu je snímaný senzorom Azure Kinect v podobe 3D mračna bodov s lokálnymi súradnicami X, Y, Z. Senzor Azure Kinect je vývojárska verzia senzoru Kinect 2 pre Windows (Kinect pre hráčku konzoly Xbox One), ktorá má lepšie rozlišovacie schopnosti ako predošlá verzia senzoru Kinect. Azure Kinect tvorí digitálna kamera pre snímání obrazu v prirodzených farbách (RGB) s rozlíšením 12 megapixelov, kamerou pre snímání hĺbky scény (vzdialenosti) s rozlíšením 1 megapixel, senzor orientácie a sústava 7 mikrofónov. Toto zariadenie je primárne určené pre aplikácie v oblasti umelej inteligencie (Albert et al., 2020; McGlade et al., 2020). Počas práce s Krajinou na dotyk sa hĺbkovým senzorom skenované 3D mračno bodov ná-

sledne importuje do prostredia GRASS GIS, kde sa vytvorí digitálny model povrchu (DSM) v lokálnych metrických súradniciach. Kľúčovým softvérovým komponentom je GRASS GIS, ktorý zabezpečuje spracovanie skenov a geopriestorové analýzy a modelovanie (GRASS Development Team, 2020; Neteler a Mitasova, 2008).

Vytvorený farebný obraz – dátová vrstva v GIS je takmer v reálnom čase premietaná projektorom s krátkou projekčnou vzdialenosťou a vhodným rozlíšením (napr. BENQ MW820ST 1280×800) priamo na fyzický model, takže premietaná farba reprezentuje vlastnosť modelu alebo výsledok geopriestorovej analýzy.

Počítač s potrebným softvérom vyžaduje hardvérové vybavenie bežné pre hráčske zostavy. Typickou zostavou je napríklad notebook s operačným systémom Linux Ubuntu 16.04 a novším procesorom AMD Ryzen 3 1300 X Quad-Core, 16 GB RAM, 230 GB SSD pevným diskom a grafickou kartou GeForce GTX 1050 Ti. Celková cena zostavy sa pohybuje okolo 2 500 – 3 500 EUR s DPH.



Obr. 1 Súčasti dotykového GIS systému Krajina na dotyk

2. Ovládanie systému Krajina na dotyk

Softvérové ovládanie systému je riadené príkazovou konzolou v GRASS GIS spúšťanou modulom *g.gui.tangible*, kde používateľ nastavuje parametre skenovania, modelovania povrchu, analýz, vykresľovania a ďalších vlastností modelu. V rámci modulu *g.gui.tangible* je senzor Azure Kinect riadený modulom *r.in.kinect* a realizuje spracovanie mračna bodov v knižnici Point Cloud Library (PCL) pomocou algoritmu KinectFusion (Petrasova et al., 2018; Newcombe et al., 2011). Konkrétne aplikácie nad fyzickým modelom sa realizujú pomocou štandardných geopriestorových

nástrojov (príkazov) v GIS-e GRASS (napr. *r.slope.aspect*, *r.sun*, *r.geomorphon*) na základe skriptov napísaných v jazyku Python. Potrebný softvér je voľne dostupný na adrese <https://tangible-landscape.github.io/> v rámci licencie GNU GPL license (Petrasova et al., 2018).

Systém Krajina na dotyk v súčasnosti poskytuje viacero typov fyzickej interakcie s modelom: (a) modifikácia tvaru modelom rukami alebo manipuláciou s vytlačeným modelom na 3D tlačiarňi, (b) umiestnením objektov na model, (c) virtuálnym kreslením na modeli laserovým ukazovátkom, (d) modelovaním a umiestnením farebného piesku, (e) vyrezávaním častí textílií a ich umiestnením na povrch modelu (Petrasova et al., 2018). Manipulácia rukami je vhodná pre piesok a umiestňovanie malých objektov reprezentujúcich prvky krajiny (napr. budovy, stromy) na povrch fyzického modelu (obr. 2). Tieto rukou vykonané zmeny sa takmer v reálnom čase premietajú do farebnej mapy premietanej projektorom na povrch fyzického modelu vrátane týchto objektov. Skener dokáže rozlíšiť farbu týchto umiestňovaných objektov a teda môže ich správne tematicky interpretovať na základe klasifikačného kritéria, čo sa dá využiť na výpočet optimálnej trasy medzi objektami so zohľadnením reliéfu alebo pri analýze krajinej pokrývky.



Obr. 2 Interakcia s fyzickým modelom z kinetického piesku pričom sa v reálnom čase premietajú vrstevnice a farby reprezentujúce výšku modelu

Materiál základu fyzického modelu, ktorý zvyčajne tvorí terén môže byť manipulovateľný rukami (napr. piesok, íl), ale aj pevný, napríklad vytlačený z 3D tlačiarne. Objekty, ktoré sa umiestňujú na terén sú zvyčajne pevné. Keď sa vytvorí fyzický model, nasledujú ďalšie kroky realizované GIS softvérom (Petrasova et al., 2018):

1. senzorom sa nasníma mračno bodov,
2. z mračna bodov sa odfiltrujú body, ktoré sú mimo oblasti modelu,
3. skenované body sa georeferencujú na hrany modelu,
4. mračno bodov sa importuje do GIS-u GRASS a vytvorí sa digitálny model povrchu,
5. vykonajú sa požadované geopriestorové analýzy,
6. vykreslia sa výsledné rastrové a vektorové dáta na povrch fyzického modelu.

Tieto kroky sú realizované plne automatizovaným spôsobom pomocou modulov *r.in.kinect* a *g.gui.tangible* v GIS-e GRASS. Krok 5 sa realizuje pomocou skriptu v jazyku Python v GIS-e GRASS a v závislosti od konkrétnej geopriestorovej analýzy. Príklady skriptov sú uvedené v repozitári Tangible Landscape GitHub (<https://tangible-landscape.github.io/>). Analýzy je možné realizovať aj priamo cez príkazový riadok alebo ovládací panel.

3. Testovacie územie a dáta

Systém Krajina na dotyk sme otestovali pre malú časť zastavaného územia Košíc, ktoré tvoria 4 km² v centrálnej časti mesta. Pre toto územie boli v rokoch 2016 až 2017 získané dáta z leteckého a pozemného laserového skenovania (LiDAR), leteckej fotogrametrie a družicových snímok. Z fotogrametrických a lidarových dát bol vytvorený 3D model územia vo vektorovom formáte v úrovni rozlíšenia LoD 2, digitálny model povrchu (DSM) a digitálny model reliéfu (DMR) s rozlíšením 0,5 m (obr. 3). Interaktívne zobrazenie cez webové rozhranie je dostupné cez:

https://uge-share.science.upjs.sk/webshared/Laspublish/ESA_Publish/ALS_Kosice.html



Obr. 3 Mračno bodov získané laserovým skenovaním a fotogrametriou zafarbené podľa nadmorskej výšky (A) a z neho odvodený plastový 3D model centra Košíc v mierke 1 : 2400 v podobe dlaždíc (19×19 cm) (B) a v priblížení na okolie Dómu sv. Alžbety (C).

Pre potreby nášho projektu sme sa rozhodli použiť digitálny model povrchu ako základ fyzického modelu systému Krajina na dotyk v podobe pevného modelu vytvoreného 3D tlačou (obr. 3B, 3C). Tieto dáta v rastrovom formáte bolo potrebné upraviť do formátov vhodných pre 3D tlač, čo sme vyriešili konverziou do nepravidelnej trojuholníkovej siete v softvéri CloudCompare. Tento model bol následne zlúčený s vektorovým 3D modelom budov. Pripravený pre tlač obsahoval 4,25 milióna trojuholníkov. V softvéri Blender (Blain, 2019) bola vymodelovaná podstava

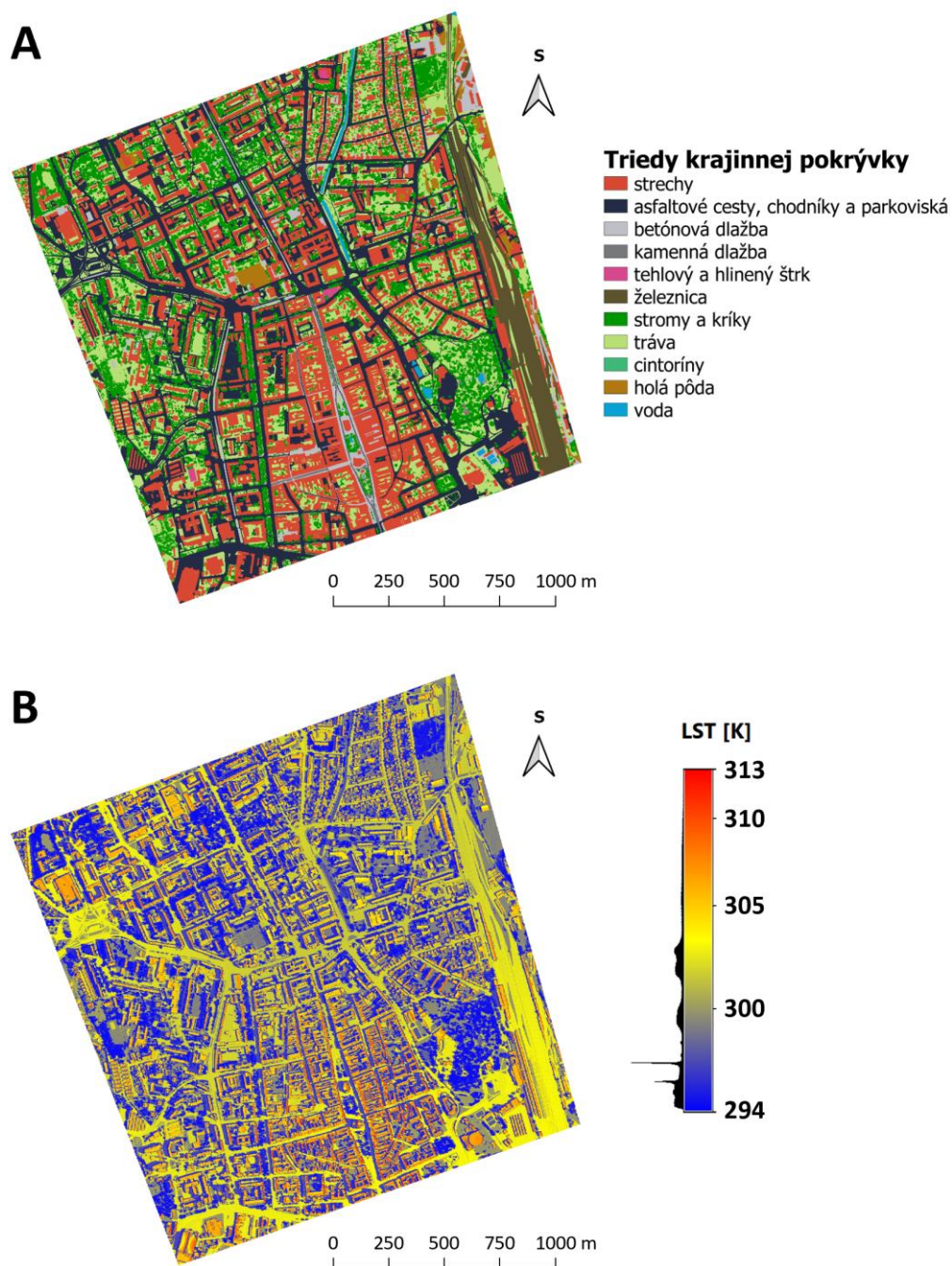
a model bol rozdelený do dlaždíc pre 3D tlač reálneho modelu v mierke 1 : 2400 (obr. 3B). 3D tlač prebiehala v spoločnosti TCX s.r.o. Košice na zariadení Sigma X2 s technológiou tlače FDM. Vytlačený fyzický 3D model testovacieho územia má tvar štvorca so stranou 95 cm a tvorí ho 25 dlaždíc so stranou 19 cm. Pre 3D tlač bol použitý materiál PLA bielej farby (kyselina polymliečna), ktorého povrch spôsobuje viac difúzny ako spekulárny odraz, primeraný pre vlnovú dĺžku žiarenia skenera Azure Kinect.

Jedným z vážnych environmentálnych dopadov prebiehajúcej klimatickej zmeny je zvyšovanie prehrievania miest (Grimmond a Oke, 1999). V posledných rokoch sa vytvára množstvo metodických postupov na sledovanie javu mestského ostrova tepla a povrchovej teploty urbanizovaných území predovšetkým pomocou využitia satelitných senzorov a modelovania v GIS-e (Hofierka et al., 2020b). Pre účely demonštrácie systému Krajina na dotyk sme použili fyzikálne založený model výpočtu teploty povrchu podľa Hofierka et al. (2020b), ktorý umožňuje modelovať teplotu povrchu krajiny v danom časovom momente na základe modelovania slnečného žiarenia a dát o vlastnostiach povrchov v prostredí GRASS GIS.

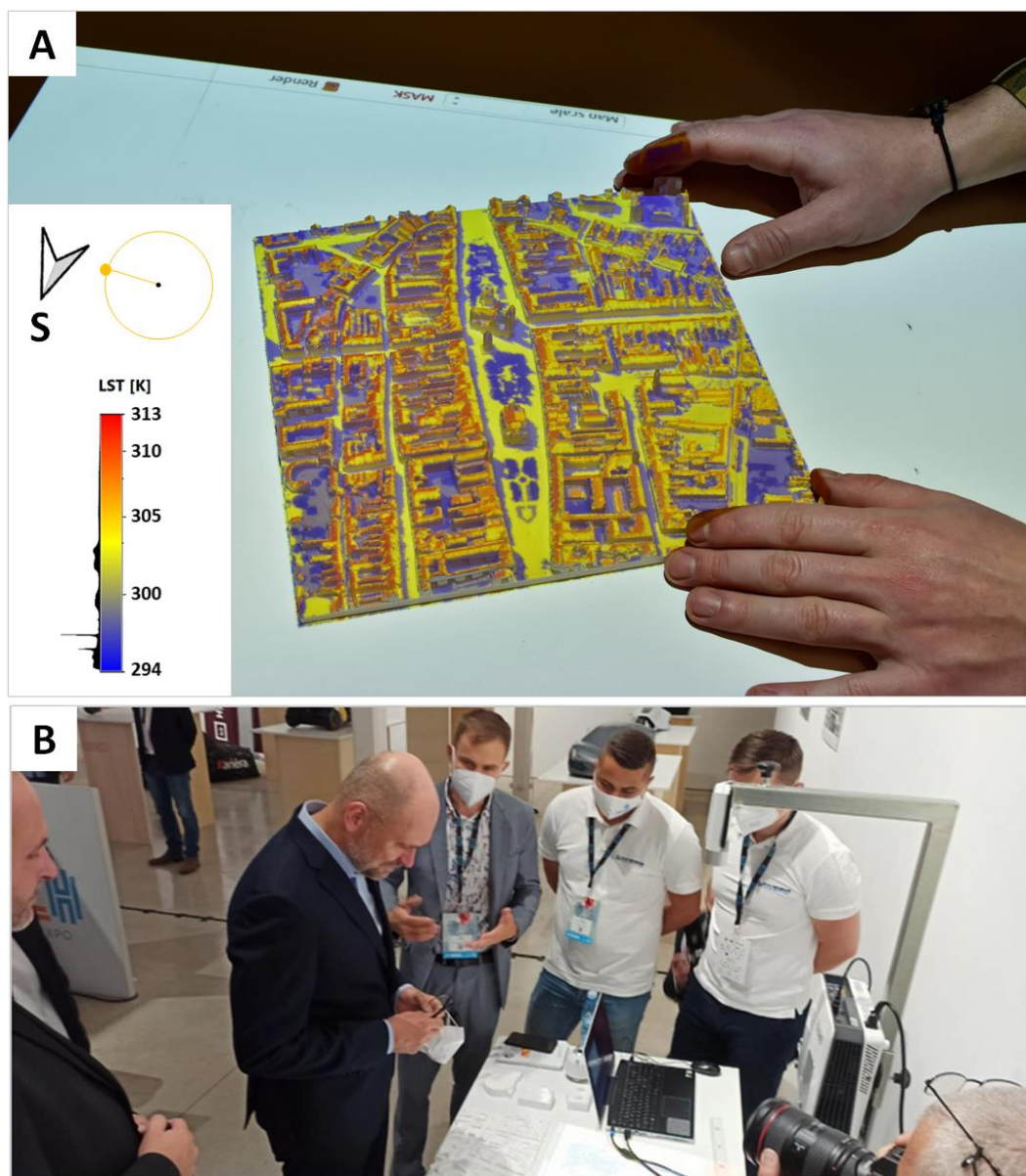
Prvým krokom na výpočet teploty povrchu krajiny je použitie modulu *r.sun* (Šúri a Hofierka, 2004) v prostredí GIS-u GRASS na výpočet okamžikového množstva slnečného žiarenia ($W \cdot m^{-2}$) dopadajúceho na územie mesta reprezentované digitálnym modelom povrchu. Slnečné žiarenie je základným zdrojom energie, ktorá spôsobuje zvyšovanie teploty povrchov. Charakteristickou vlastnosťou mestského prostredia je veľká geometrická a materiálová heterogenita územia. Preto je dôležité zohľadniť aj parametre jednotlivých povrchov a ich tepelné vlastnosti, ktoré vstupujú do výpočtov, akými sú albedo, emisivita materiálu na povrchu, koeficient prenosu tepla konvekciou alebo schopnosť materiálov akumulovať a uchovávať teplo. Tieto dáta je možné získať z existujúcich databáz pre jednotlivé typy krajiny pokrývky (obr. 4A) alebo odhadnúť z dát diaľkového prieskumu Zeme (Hofierka et al., 2020a). Pomocou Kirchhoffovho zákona o tepelnom žiarení, Stefan-Boltzmannovho zákona, ktorý opisuje vyžarovanie tepelnú energiu čiernym telesom je možné modelovať konverziu dopadajúceho slnečného žiarenia na tepelnú energiu a následne na teplotu povrchu a vizualizovať priestorové rozloženie teploty povrchu krajiny v mestskom prostredí. Hofierka et al. (2020a) pomocou týchto nástrojov v GIS-e GRASS namodelovali situáciu v našom testovacom území pre 25. jún 2020 a pre rôzne časové momenty daného dňa, keď boli teploty aj priamo merané v teréne a teda bolo možné verifikovať výsledky modelovania. Výsledné rastrové dátové vrstvy povrchovej teploty poslúžili ako kľúčová informácia o teplotných pomeroch v meste (obr. 4B). Táto vrstva sa prostredníctvom dátového projektora premietala na povrch fyzického modelu v podobe farby.

4. Výsledky a diskusia

V rámci modelovania teploty povrchu, sme sa zamerali na parametre jednotlivých typov materiálu povrchu v meste. Zohľadnili sme schopnosť povrchu absorbovať a uchovávať teplo a s časovým oneskorením ho emitovať do okolia, ktorú sme zohľadnili použitím objektívneho hysterézného modelu (Grimmond a Oke, 1999). Výsledkom bolo 14 rastrových vrstiev, ktoré reprezentujú priestorové rozloženie teploty povrchu v rámci študovaného územia v hodinových intervaloch. V rámci nami vybraného časového intervalu (od 6:00 do 19:00) dňa 25. júna 2020, bol identifikovaný časový posun, kedy teplota povrchu dosahovala najvyššie hodnoty (Hofierka et al., 2020a). Zahnutím funkcie hysterézy teploty do výpočtov, sme dokázali presnejšie simulovať dynamiku tohto javu a priestorové rozloženie teploty povrchu v meste. Pre potreby vizualizácie povrchovej teploty na 3D modeli mesta bol vybraný časový okamih o 14. hodine, dňa 25. júna 2020 (obr. 4 a 5). Vo vybranom okamihu azimut Slnka predstavuje 220° a jeho výška je približne 60° nad horizontom. Vytlačený 3D model neobsahuje prvky reprezentujúce vegetačnú pokrývku, avšak výpočty povrchovej teploty ju zohľadňujú, a to ako súčasť digitálneho modelu povrchu (DSM) použitého v module *r.sun*. Z tohto dôvodu môžeme vzhľadom k výskytu vegetácie (najmä stromov) identifikovať v rámci 3D modelu rozdielne teploty povrchu pri rovnakej výške povrchu, napríklad v rámci Hlavnej ulice na obr. 5.



Obr. 4 Krajinná pokrývka interpretovaná z leteckej ortofotosnímky a terénneho mapovania (A), 2D vizualizácia teploty povrchu o 09:00, 25. júna 2020 (B)



Obr. 5 Vizualizácia povrchovej teploty (Land Surface Temperature, LST) v kelvinoch na 3D modeli centra mesta Košice (A) a jej využitie s Krajinou na dotyk pre komunikáciu vedeckých výsledkov do praxe počas veľtrhu Slovakia Tech Expo-Forum 2021 (B)

Využitím systému Krajina na dotyk vrátane vytlačeného 3D modelu mesta Košice a rastrových vrstiev teploty povrchu pre rôzne časové momenty počas dňa bolo možné preukázať použitie tohto systému pre interaktívnu vizualizáciu dát v urbánnom prostredí (obr. 5A). So zvyšujúcou sa kvalitou 3D tlače a teda aj fyzických modelov je možné zobrazit' aj komplexné štruktúry v rámci urbanizovaných území. Je potrebné uviesť, že premietané hodnoty povrchovej teploty boli vypočítané

pre digitálny model povrchu, ktorý len aproximuje skutočný 3D model mesta. Z toho vyplýva nižšia presnosť modelovania najmä pre vertikálne povrchy, ako sú fasády.

Slabou stránkou je tiež efekt tienenia v hustej zástavbe spôsobený použitím len jedného senzora a projektora. Vertikálne povrchy a centrálna projekcia projektora spôsobuje, že časť najmä vertikálnych povrchov je zatienená samotnými štruktúrami fyzického modelu. To by bolo možné eliminovať snímaním a premietaním z viacerých zariadení a pozícií naraz, čo však modul *r.in.kinect* zatiaľ neumožňuje. Nevýhodou pri použití súvisle vytlačeného fyzického 3D modelu mesta je tak tiež slabá miera interaktivity, keďže nie je možné odstraňovanie objektov v modelovanom priestore v prípade pevných segmentov, a teda ponúka sa len možnosť pridávania dodatočných objektov. V prípade menších segmentov fyzického modelu až na úroveň budov sú však možnosti interakcie väčšie. V prípade použitia inverzného 3D modelu urbanizovaného územia vo väčšej mierke ako v našom prípade a jeho odtlačku do kinetického piesku by tu bola možnosť interakcie používateľa s týmto materiálom a dovoľovala by pozorovať dôsledky spôsobených zmien v záujmovom území vrátane terénnych úprav. Zmeny vlastností krajiny pokrývky by bolo možné realizovať použitím farebného piesku alebo vystrihnutých kusov látky pre interaktívnu klasifikáciu krajiny pokrývky v podobe zmeny využívaných materiálov a umiestňovania zelených plôch v rámci modelovaného územia. Tento aspekt interakcie sme v prezentovanom príspevku netestovali. Je to však dobrým námetom do budúcej práce, v ktorej by bolo možné využiť interaktivitu systému a zadať používateľom úlohu zmeniť konfiguráciu parkov, či stromov v nich sledujúc zmeny teploty povrchu. Výpočet rastrovej vrstvy teploty nami použitým postupom zahŕňa postupnosť viacerých krokov. Preto je plnohodnotné interaktívne využitie systému Krajina na dotyk v modelovaní zmien krajiny pokrývky a ich vplyvu na teplotu povrchu v reálnom čase podmienené automatizáciou modulu LST v rámci *g.gui.tangible*, čo bude predmetom ďalšieho výskumu.

Napriek týmto súčasným obmedzeniam technológie je treba vyzdvihnúť predovšetkým názorovosť interaktívnej vizualizácie výsledkov a možnosť využitia geopriestorových analýz v rozhodovacích procesoch urbánneho plánovania. Na rozdiel od klasického 2D znázornenia je zrejмый vplyv tieňov vyšších objektov a pre konkrétnu časť dňa. Fyzický 3D model zastavaného územia teda umožňuje lepšie vnímať súvislosť geometrických štruktúr územia s daným fenoménom. Používateľ vidí priamu súvislosť medzi hustotou a výškou zástavby s priestorovou distribúciou povrchovej teploty. Tieto aspekty systému Krajiny na dotyk sme využili pri vysvetľovaní významu modelovania teploty v meste predstaviteľom vlády Slovenskej republiky a Magistrátu mesta Košice počas odborného veľtrhu Slovakia Tech Expo-Forum v Košiciach (obr. 5B).

Záver

Systém Krajina na dotyk predstavuje nový nástroj pre vizualizáciu a interakciu používateľa s geopriestorovými dátami. V tomto príspevku sme predstavili aplikáciu tohto systému pre oblasť modelovania povrchovej teploty v urbanizovanom území reprezentovanom fyzickým 3D modelom, ktorý bol vytlačený na 3D tlačiarňu. Naše výsledky ukázali, že s využitím nástrojov GIS, sme schopní modelovať teplotu povrchu urbanizovanej krajiny a vizualizovať tieto výsledky aj prostredie systému dotykového interaktívneho používateľského rozhrania. To umožnilo lepšie pochopiť súvislosti geometrických štruktúr urbanizovaného územia (hustota zástavby, efekt tieňov) a povrchovej teploty. Jednou z výhod systému Krajina na dotyk je kombinácia s reálnym 3D modelom územia umožňujúcim priamy kontakt s používateľom, čo umožňuje odovzdať požadovanú informáciu o krajine v zjednodušenej a názornejšej podobe. Práve vďaka tomuto systému vieme zdieľať vedecké poznatky aj širšej verejnosti alebo študentom a bližšie im predstaviť problematiku prehrievania miest a zvýšiť povedomie o fenoméne mestských ostrovov tepla. Budúci výskum si vyžaduje robustnejšie a kvantitatívne testovanie prínosu dotykových informačno-komunikačných rozhraní v geovedných aplikáciách.

Podakovanie: Tento príspevok je súčasťou riešenia projektov APVV-18-0044, APVV SK-CN-RD-18-0015, VEGA 1/0300/19 a VVGS-pf-2021-1776.

Literatúra

- ALBERT, J. A., OWOLABI, V., GEBEL, A., BRAHMS, C. M., GRANACHER, U., ARNRICH, B. (2020). Evaluation of the pose tracking performance of the azure kinect and kinect v2 for gait analysis in comparison with a gold standard: A pilot study. *Sensors*, 20(18), 5104. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20185104>
- BARVIR, R., VONDRAKOVA, A., BRUS, J. (2021). Efficient Interactive Tactile Maps: A Semi-Automated Workflow Using the TouchIt3D Technology and OpenStreetMap Data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(8), 505. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi10080505>
- BLAIN, J. M. (2019). *The complete guide to Blender graphics: computer modeling & animation*. Boca Raton (AK Peters/CRC Press). DOI: <https://doi.org/10.1201/9780429196522>
- GRASS Development Team (2020). *Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software, Version 7.8*. Open Source Geospatial Foundation. Dostupné na: <https://grass.osgeo.org>
- GRIMMOND, C. S. B., OKE, T. R. (1999). Heat Storage in Urban Areas: Local-Scale Observations and Evaluation of a Simple Model. *Journal of Applied Meteorology*, 38(7), 922-940.
- HOFIERKA, J., BOGLARSKÝ, J., KOLEČANSKÝ, Š., ENDEROVA, A. (2020a). Modeling Diurnal Changes in Land Surface Temperature in Urban Areas under Cloudy Conditions. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(9), 534. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi9090534>
- HOFIERKA, J., GALLAY, M., ONAČILLOVÁ, K., HOFIERKA, J., JR. (2020b). Physically-based land surface temperature modeling in urban areas using a 3-D city model and multispectral satellite data. *Urban Climate*, 31, 100566. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100566>
- HOFIERKA, J., GALLAY, M., ŠUPINSKÝ, J., GALLAYOVÁ, G. (2022). A tangible landscape modeling system for geography education. Education and Information Technologies. In press. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10639-021-10847-y>
- MARSHALL, P. (2007). Do tangible interfaces enhance learning? In *Proceedings of the 1st International Conference on Tangible and Embedded Interaction*. Baton Rouge, 163-170. DOI: <https://doi.org/10.1145/1226969.1227004>
- MCGLADE, J., WALLACE, L., HALLY, B., WHITE, A., REINKE, K., JONES, S. (2020). An early exploration of the use of the Microsoft Azure Kinect for estimation of urban tree Diameter at Breast Height. *Remote Sensing Letters*, 11(11), 963-972.
- MILLAR, G. C., TABRIZIAN, P., PETRASOVA, A., PETRAS, V., HARMON, B., MITASOVA, H., MEETENMEYER, R., K. (2018). Tangible Landscape: A Hands-on Method for Teaching Terrain Analysis. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. Montreal, 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1145/3173574.3173954>
- MITASOVA, H., MITAS, L., RATTI, C., ISHII, H., ALONSO, J., HARMON, R. S. (2006). Real-time landscape model interaction using a tangible geospatial modeling environment. *IEEE computer graphics and applications*, 26(4), 55-63.
- NETELER, M., MITASOVA, H. (2008). Open Source GIS: A GRASS GIS Approach. Third Edition. *The International Series in Engineering and Computer Science*, Volume 773, New York (Springer).
- NEWCOMBE, R. A., MOLYNEAUX, D., KIM, D., DAVISON, A. J., SHOTTON, J., HODGES, S., FITZGIBBON, A. (2011). KinectFusion : Real-Time Dense Surface Mapping and Tracking. In *Proceedings of the 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*. Basel, 127-136. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2011.6092378>
- PETRASOVA, A., HARMON, B., PETRAS, V., TABRIZIAN, P., MITASOVA, H. (2018). *Tangible Modeling with Open Source GIS*. Second edition. New York (Springer).
- PETRASOVA, A., GAYDOS, D. A., PETRAS, V., JONES, C. M., MITASOVA, H., MEENTEMEYER, R. K. (2020). Geospatial simulation steering for adaptive management. *Environmental Modelling & Software*, 133, 104801. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104801>
- ŠÚRI, M., HOFIERKA, J. (2004). A new GIS-based solar radiation model and its application to photovoltaic assessments. *Transactions in GIS*, 8(2), 175-190.
- TONINI, F., SHOEMAKER, D., PETRASOVA, A., HARMON, B., PETRAS, V., COBB, R. C., MITASOVA, H., MEENTEMEYER, R. K. (2017). Tangible geospatial modeling for collaborative solutions to invasive species management. *Environmental Modelling & Software*, 92, 176-188. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.02.020>
- WOODS, T. L., REED, S., HSI, S., WOODS, J. A., WOODS, M. R. (2016). Pilot Study Using the Augmented Reality Sandbox to Teach Topographic Maps and Surficial Processes in Introductory Geology Labs. *Journal of Geoscience Education*, 64, 3, 199-214.

Summary

Tangible landscape: new forms of visualization and geospatial data interaction

The advance of modern and innovative technologies has brought new means of visualizing geospatial data such as tangible landscape modeling systems. They provide users with the ability to work intuitively and interactively with a physical three-dimensional (3D) model of the landscape, increasing creativity, analytical thinking, imagination, and the ability to perceive, manipulate, and interact with multidimensional space. The components of the system are affordable making it possible to implement the system in the educational process already in primary and secondary schools and other educational institutions. We present a tangible geographic modeling system, termed Tangible Landscape, comprising: (a) a physical 3D model that can be manipulated and modified by the user or a model printed on a 3D printer, (b) an Azure Kinect 3D scanner that captures the surface of the physical model, (c) a digital projector that projects colored geospatial data layers calculated in GIS onto the surface of the physical model; (d) a conventional computer, e.g. laptop with GRASS GIS software installed. The software control of the system is based on modules, through which the user sets the individual parameters of scanning, surface modeling, analysis, and rendering. As part of the Azure Kinect sensor control module, it is possible to process the scanned point clouds using the Point Cloud Library and the KinectFusion algorithm. Currently, the Tangible landscape modeling system provides 5 types of physical interaction with the model: (a) manipulation of the model by hand or printing by a 3D printer, (b) placement of objects on the model, (c) drawing with a laser pointer, (d) modeling and placement of colored sand; (e) cutting out parts of textiles (Petrasova et al., 2018). In this study, we used a solid model created by 3D printing from polylactic acid (PLA) as the basis for the physical model of tangible landscape modeling system onto which we the results of land surface temperature modelling were projected as a coloured image. The modelling was performed in the GRASS GIS environment in the case study of the Košice City. The data used for construction of the digital 3D city model were acquired in 2016 and 2017 using airborne and terrestrial laser scanning, aerial photogrammetry, and multispectral satellite remote sensing. The plastic 3D model was derived from the lidar and photogrammetry data in vector format at the LoD 2 resolution level and a digital surface model with a resolution of 0.5 m. We used the approach defined by Hofierka et al (2020b) for modeling land surface temperature using the *stefan.boltzman.sh* script implemented in GRASS GIS. The first step was to derive the amount of solar radiation incoming onto the urban surface by the *r.sun* module. Then Kirchhoff's law of thermal radiation and Stefan-Boltzman's law were implemented in the GRASS shell script to model the temperature of the surface by taking the heat transfer storage and emission into account. We also implemented the Objective Hysteresis Model (Grimmond and Oke, 1999) in the calculations to model the dynamics of the urban heat island and the spatial distribution of land surface temperature in the city more accurately. The resulting raster layers of surface temperature provided means for identifying overheated areas in the city and the layers were projected by the data projector back on the 3D physical model as a color image. By using the Tangible Landscape system, we demonstrated its benefits for interactive data visualization in the urban environment during public events. Our results showed that using GIS tools, we can model land surface temperature of urban areas, visualize geospatial data and use tangible landscape modeling system, provide the user with direct contact with the 3D model, and to better understand the relationship between the 3D morphology urban environment and the land surface temperature. Tangible Landscape system enabled sharing the scientific knowledge with the general public and increase the awareness and involvement of the public with the issue of urban heat island.

Fig. 1 Components of the Tangible Landscape GIS system.

Fig. 2 Interaction with the physical 3D model made of kinetic sand with projected contours and coloured surface elevation while sculpting the relief in real time.

Fig. 3 Point cloud acquired by lidar and photogrammetry coloured by elevation (A) and the derived 3D plastic city model of Košice in 1 : 2400 tiled (each tile 19 x 19 cm) (B) and in detail of the historical city centre (C).

Fig. 4 Land cover interpreted from orthophotograph and field mapping (A), 2D visualization of land surface temperature at 9:00 AM, 25th June 2020 (B).

Fig. 5 Land Surface Temperature (LST) visualization in Kelvins on a 3D model of the Košice city center (A) and its use with the Tangible landscape for the communication of the scientific results into practice during the Slovakia Tech Expo-Forum 2021 (B).

Prijaté do redakcie: 29. októbra 2021

Zaradené do tlače: december 2021