



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ

DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

3D VÝUKOVÁ APLIKACE S VYUŽITÍM HLOUBKOVÝCH SENZORŮ

3D EDUCATIONAL APPLICATION USING THE DEPTH SENSORS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

TOMÁŠ ZUBRIK

Ing. MARTIN VEĽAS

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce



20685

Student: **Zubrik Tomáš**
Program: Informační technologie
Název: **3D výuková aplikace s využitím hloubkových senzorů**
3D Educational Application Using the Depth Sensors
Kategorie: Zpracování obrazu

Zadání:

1. Prostudujte základní metody zpracování obrazu a hloubkových dat. Zaměřte se na problematiku kalibrace senzorů s projektorem a využívání interaktivních výukových metod.
2. Navrhněte jednoduchou aplikaci, která je schopná určit kalibraci hloubkového senzoru s projektorem.
3. Navrhněte aplikaci pro výukové účely, která bude využívat hloubkové data a interakci s projekční plochou. Můžete se inspirovat existujícími realizacemi.
4. Aplikaci implementujte a realizujte experimenty pro ověření použitelnosti.
5. Realizujte experimentální prototyp a jednoduché uživatelské testy.
6. Vytvořte video, které prezentuje obsah vaší práce a dosažené výsledky.

Literatura:

- Dle pokynů vedoucího.

Pro udělení zápočtu za první semestr je požadováno:

- Splnění prvních tří bodů zadání.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování práce viz <http://www.fit.vutbr.cz/info/szz/>

Vedoucí práce: **Veřás Martin, Ing.**
Vedoucí ústavu: Černocký Jan, doc. Dr. Ing.
Datum zadání: 1. listopadu 2018
Datum odevzdání: 15. května 2019
Datum schválení: 1. listopadu 2018

Abstrakt

Táto práca sa zaoberá vytvorením interaktívneho výukového systému, ktorý využitím hĺbkového senzora a projektora vykresluje interaktívnu topografickú mapu na povrch piesku. Pri realizácii sa vychádzalo z existujúceho riešenia, ktoré predstavuje aplikácia AR Sandbox. Aplikácia okrem vizualizácie nadmorských výšok umožňuje interaktívne modelovanie terénu, pričom používateľa navádza farebným odlíšením k jeho správne modelovaniu. Bolo pripravené rozšírenie, ktoré umožňuje užívateľovi zvoliť si ľubovoľnú časť zemského povrchu pre vytváranie jej modelu. Riešenie využíva plný potenciál pôvodnej aplikácie a užívateľovi ponúka zažiť pútavú skúsenosť pri modelovaní známej oblasti zemského reliéfu či povodia rieky. Výsledkom práce je funkčný systém, nápomocný pre získavanie poznatkov z oblasti topografie a hydrológie. Užívateľské testovanie pomocou dotazníka UEQ ukázalo použiteľnosť, pričom pri dosiahnutí priemerného skóre 1.2, je riešenie na škále UEQ hodnotené ako nadpriemerný výsledok.

Abstract

This work deals with the creation of an interactive learning system that uses depth sensor and projector to render an interactive topographic map on the top of the sand surface. Our solution is based on the existing application AR Sandbox. Additionally to the visualization elevation, the application allows the user to model the terrain model interactively, while guiding him by color distinguishment to create model correctly. We have developed an extension that allows the user to choose any part of the Earth's surface to create its model. The solution utilizes the full potential of the original application and offers the user an engaging experience in modeling the landforms or river basins. The result of this work is an operational system, which is helpful for gaining the knowledge in the field of topography and hydrology. User testing was evaluated using a UEQ questionnaire and has proven the usability, while achieving average score of 1.2, which is rated above-average on the UEQ scale.

Kľúčové slová

hĺbkový senzor, Kinect, kalibrácia, interaktívne metódy, AR Sandbox, topografia, digitálny výškový model

Keywords

depth sensor, Kinect, calibration, interactive methods, AR Sandbox, topography, digital elevation model (DEM)

Citácia

ZUBRIK, Tomáš. *3D výuková aplikace s využitím hloubkových senzorů*. Brno, 2019. Bakalárska práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Martin Velas

3D výuková aplikace s využitím hloubkových senzorů

Prehlásenie

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne pod vedením pána Ing. Martina Velasa. Uviedol som všetky literárne pramene a publikácie, z ktorých som čerpal.

.....

Tomáš Zubrik

15. mája 2019

Podakovanie

Týmto by som veľmi rád poďakoval Ing. Martinovi Velasovi za poskytnutý čas, cenné rady a odbornú pomoc pri riešení tejto práce.

Obsah

1	Úvod	3
2	Teoretická časť	5
2.1	Interaktívne metódy	5
2.1.1	Interaktívny výukový systém	5
2.2	Kalibrácia	6
2.2.1	Kalibrácia kamery	7
2.2.2	Homografia	9
2.3	Kinect v1	9
2.3.1	Komponenty	10
2.3.2	Princíp merania hĺbky trianguláciou	12
2.3.3	Využitie	14
2.4	Topografia	15
2.4.1	Výšková mapa	15
2.4.2	DEM - Digitálny výškový model	16
2.4.3	Mercatorova projekcia	17
2.4.4	Zemepisná šírka a dĺžka	18
2.4.5	Haversine vzorec	19
2.5	AR Sandbox	20
2.5.1	DEM Tool	20
2.5.2	VR Vrui Toolkit	21
2.5.3	Kinect 3D Video Package	22
3	Realizácia systému AR Sandbox	23
3.1	Hardware	23
3.1.1	Počítač	23
3.1.2	Hĺbkový senzor	24
3.1.3	Projektor	24
3.1.4	Sandbox	25
3.1.5	Piesok	25
3.2	Rovnica základnej roviny	27
3.3	Kalibrácia	27
3.3.1	Kalibrácia kamery	27
3.3.2	Kalibrácia medzi projektorom a Kinectom	28
4	Návrh riešenia	29
4.1	Základná myšlienka	29
4.2	Problémy	30

4.3	Geografické dáta	30
4.3.1	ASTER Global DEM	30
4.4	Typ aplikácie	31
4.5	Schéma systému	32
4.6	Analýza požiadaviek	33
4.7	Grafické používateľské rozhranie	33
4.7.1	Mockup - grafický návrh	33
4.8	Získavanie a uchovávanie dát	35
4.9	Konverzia DEM do formátu grid	36
4.10	Škálovanie a predanie grid do AR Sandbox	37
5	Implementácia rozširujúceho modulu	39
5.1	Technológie	39
5.1.1	Backend	39
5.1.2	Frontend	40
5.2	Užívateľské rozhranie	40
5.3	Stahovanie dát	40
5.4	Konverzia DEM	41
5.5	Predanie súboru grid aplikácii AR Sandbox	42
5.6	Uchovávanie dát	42
6	Testovanie a výsledky	43
6.1	UEQ	43
6.2	Návrh testovania	44
6.2.1	Úvodný ukázkový prípad	44
6.2.2	Testovací prípad č.1	45
6.2.3	Testovací prípad č.2	46
6.3	Vyhodnotenie testovania	46
6.3.1	Skúsenosti užívateľov a námety na zlepšenie	46
6.3.2	Výsledky UEQ a ich interpretácia	47
7	Záver	49
	Literatúra	50
A	Obsah CD	52

Kapitola 1

Úvod

V dnešnej dobe narastá snaha pedagógov urobiť vyučovacie hodiny atraktívnejšími, a tým zvýšiť motiváciu študentov v danej oblasti. Využitie interaktívnych prvkov vo vyučovacom procese sa v súčasnosti vníma ako jedna z najúčinnějších metód pri jeho skvalitňovaní. Vďaka použitiu interaktívnych prvkov sa pre študenta mení vyučovacia hodina tak, že rolu pasívneho poslucháča nahradí aktívne zapájanie sa a spolupráca pri vysvetľovaní problematiky.

Jeden z existujúcich prístupov ako implementovať interaktívne prvky do vyučovacieho procesu predstavujú aj 3D výukové aplikácie. Istá časť z nich využíva na interakciu s užívateľom hĺbkové senzory, ktoré reagujú na užívateľské gestá alebo na určité akcie, ktoré užívateľ vykonáva. Príkladom hĺbkového senzora je aj zariadenie Kinect na snímanie pohybu a gest. Pomocou získavania a spracovania hĺbkových dát sú aplikácie schopné interakcie s užívateľom. Oblasť topografie a spracovania máp taktiež môžeme priblížiť študentom či nadšencom geografie prostredníctvom využitia hĺbkových sensorov a súvisiacej interakcie s užívateľom.

Existuje viacero realizovaných aplikácií, ktoré tento koncept pokrývajú. Jednou z nich je aplikácia *Augmented Reality Sandbox* (AR Sandbox), ktorá je zameraná na oblasť topografie a hydrológie. Interaktívnym spôsobom poskytuje možnosti pre modelovanie kopcov, údolí a vodných nádrží s využitím piesku s rozšírenou realitou.

Spomínaná aplikácia AR Sandbox pracuje v dvoch módoch. Prvý z nich je základný mód, ktorý v reálnom čase vykresľuje topografickú mapu na povrch piesku na základe jeho výšky (vzdialenosti od hĺbkového senzora) v jednotlivých oblastiach. Zámerom druhého módu je farebným odlíšením navádzať užívateľa k vymodelovaniu mapy zemského reliéfu. Tento mód nie je pre bežného užívateľa použiteľný, pretože aplikácia neposkytuje možnosť výberu mapy. Ďalším nedostatkom druhého módu aplikácie AR Sandbox je absencia podpory štandardných geografických formátov reprezentujúcich výškové mapy.

Možnosti použitia tohto módu sú obmedzené a preto, sme sa rozhodli predstaviť riešenie, ktoré by tento mód sprístupňovala bežnému užívateľovi. Vystala úloha vytvorenia modulu, ktorého hlavným prínosom je možnosť výberu skutočnej mapy na základe voľby užívateľa. Následné modelovanie známeho pohoria či povodia rieky (v porovnaní s modelovaním neznámej oblasti) posúva možnosti aplikácie AR Sandbox na iný level. V rámci tejto práce bola vytvorená webová aplikácia s grafickým používateľským rozhraním, ktorá predstavuje riešenie nedostatkov druhého módu. Aplikácia na základe požiadaviek užívateľa vytvára súbory vo formáte použiteľnom v aplikácii AR Sandbox z lokálne dostupných geografických dát. V prípade, že pre zvolenú oblasť nie sú dáta k dispozícii aplikácia získava dáta v štandardnom geografickom formáte zo vzdialeného servera a konvertuje ich do použiteľného formátu upravením rozlíšenia a mierky výškových hodnôt. Okrem toho umožňuje

užívateľovi načítavanie a automatické ukladanie súborov a jednoduché spustenie aplikácie AR Sandbox s vybranou mapou.

Samotnému návrhu a implementácii rozširujúceho modulu pre výber mapy predchádzala fyzická realizácia systému podľa požiadaviek aplikácie AR Sandbox. V rámci tejto práce boli fyzicky vyhotovené a skonštruované všetky dôležité súčasti, ktoré dohromady tvoria výsledný systém. Bol navrhnutý a zostrojený stôl s pieskom, spolu s konštrukciou, na ktorej sú upevnené ďalšie hardvérové komponenty – Kinect a projektor. Vyhotovený systém v spojení s aplikáciou AR Sandbox je vhodným prostriedkom pre reprezentačné účely fakulty. Táto fyzická realizácia môže nájsť uplatnenie aj pri vytváraní ďalších výukových systémov. Po fyzickej realizácii bol systém prepojený s aplikáciou AR Sandbox a následne bola uskutočnená kalibrácia medzi projektorom a Kinectom vstavaným kalibračným nástrojom.

V nasledujúcej kapitole *Teoretická časť* budú popísané jednotlivé uvažované aspekty a ich teoretický základ. Kapitola 4 – *Návrh riešenia* popisuje použité dáta a formáty, koncept GUI rozširujúceho modulu a jeho prepojenia s aplikáciou AR Sandbox. V kapitole 3 – *Realizácia systému AR Sandbox* budú predstavené požiadavky a realizácia systému pre použitie aplikácie AR Sandbox. V kapitole 5 – *Implementácia rozširujúceho modulu* budú popísané použité programovacie prostriedky, využité knižnice, spôsob implementácie rozširujúceho modulu a popis jeho najdôležitejších častí. Kapitola 6 – *Testovanie a výsledky* obsahuje návrh a výsledky užívateľského testovania. Zhrnutie dosiahnutých výsledkov a zhodnotenie miery splnenia vytýčených cieľov sa nachádza v kapitole 7 – *Záver*.

Kapitola 2

Teoretická časť

2.1 Interaktívne metódy

Informačné a elektrokomunikačné technológie v spojitosti s moderným interaktívnym vyučovaním predstavujú hlavný trend vo vyučovacom procese dnešnej doby. Interaktívne metódy umožňujú realizovať a riešiť nové typy úloh a vhodným spôsobom zavádzajú nové možnosti v oblasti pedagogických procesov. Proces implementácie informačných technológií do vyučovacieho procesu predstavuje neodmysliteľnú súčasť pri jeho skvalitňovaní. Využívanie interaktívnych metód v oblasti vzdelávania pomáha študentom si ľahšie zapamätať a osvojiť si nové poznatky, rýchlejšie pochopiť danú problematiku a motivovať ich k hlbšiemu záujmu o získavanie informácií a učenie sa [23].

Interaktívne metódy teda výrazným spôsobom ovyplňujú vzdelávanie a vyučovanie. S rozvojom informačných technológií, ktoré sú dnes bežne dostupné, je priam žiaduce a odporúča sa využívať interaktívne metódy kvôli ich všeobecnému prínosu a efektívnosti pri vzdelávaní. Príkladom interaktívneho prístupu môže byť interaktívna tabuľa. Nejedná sa o celkom novú technológiu, pretože boli využívané už v 90. rokoch minulého storočia. Ak nahliadneme do inštitúcií, ktoré sa venujú vzdelávaniu môžeme konštatovať, že pre vzdelávacie potreby a účely, sú využívané vo všetkých vyspelých krajinách.

Interaktívna tabuľa je vlastne dotykovo-senzitívna plocha, pomocou ktorej prebieha aktívna interakcia medzi užívateľom a počítačovým zariadením, ktorá ma za cieľ sprostredkovať maximálnu možnú mieru názornosti zobrazovaného obsahu. Veľmi často je využívaná spolu s projektorom a počítačom. Tradičné spojenie interaktívnej tabule, projektora a počítača je postupne doplňované o ďalšie pokročilejšie prvky a vznikajú tzv. interaktívne výukové systémy [3].

2.1.1 Interaktívny výukový systém

Táto bakalárska práca taktiež pracuje so systémom, ktorý môžeme považovať za interaktívny výukový systém. Uvažujeme spojenie interaktívnej plochy (namiesto tabule), projektora, počítača a zariadenia Kinect¹, ktoré predstavuje pridaný prvok v porovnaní s tradičnými prvkami interaktívnych výukových systémov. Zrealizovaná aplikácia, či interaktívny systém slúži na vytváranie 3D reprezentácie topografickej mapy a jeho bližší popis bude uvedený v nasledujúcich kapitolách. Môžeme si všimnúť určitú analógiu medzi tradičným interaktívnym výukovým systémom a nami uvažovaným, ale je medzi nimi jeden dôležitý

¹Viac informácií v sekcii 2.3



Obr. 2.1: Interaktívny výukový systém - interaktívna tabuľa s projektorom

rozdiel. Náš uvažovaný interaktívny systém je jednoúčelový, slúži na vzdelávanie a získavanie informácií z jednej vednej oblasti, ktorou je topografia². Tradičný systém nemá implicitne vymedzený účel ani vednú disciplínu, ktorou sa zaoberá. Existujú mnohé interaktívne realizácie výukových systémov, ktoré využívajú interakčnú plochu, projektor a zariadenie Kinect. Jednou z nich je práve aplikácia AR Sandbox [10], ktorá sa zaoberá topografickým zobrazovaním priestoru a vrstevníc využívajúca farebné odlíšenie na základe hĺbky snímanej hĺbkovým senzorom. Práve z tejto aplikácie vychádza naša práca, ktorá spomínanú aplikáciu inovuje a pridáva funkcionality s možnosťou výberu konkrétnej mapy z daného regiónu krajiny. Jej následným modelovaním pomocou piesku prebieha interakcia medzi užívateľom a interaktívnym výukovým systémom.

2.2 Kalibrácia

Kalibrácia je neoddeliteľnou súčasťou počítačového videnia, kde pri použití viacerých zariadení, ktoré majú vlastný súradnicový systém, je nutné nájsť vzťah medzi ich súradnicovými systémami [2].

Uvažujeme dve zariadenia, ktorými sú hĺbkový senzor a projektor. Hĺbkový senzor zachytáva skutočné hĺbkové dáta snímaného 3D priestoru a poskytuje ich v tzv. mračne bodov (point-cloud). Narozdiel od hĺbkového senzoru, projektor pracuje s 2D súradnicovým systémom. V nasledujúcich sekciách je popísaný jeden zo základných prístupov na určenie

²Viac informácií v sekcii 2.4

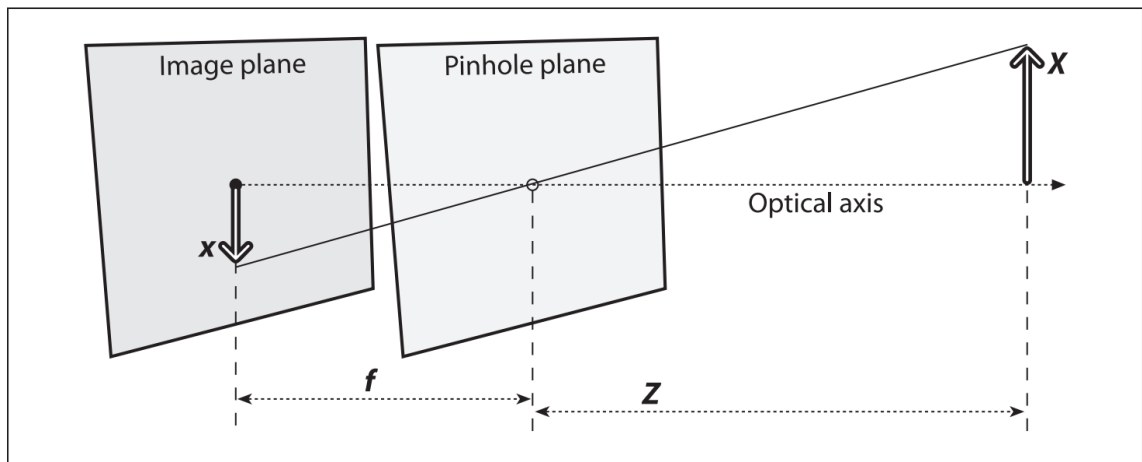
kalibrácie kamery a homografie medzi súradnicovými systémami. Tým, že sme využili aplikáciu AR Sandbox ako základ našej práce, princíp, proces kalibrácie a určenie homografie medzi projektorom a Kinectom je popísaný v sekcii 3.3.

2.2.1 Kalibrácia kamery

Kalibrácia kamery, tiež označovaná ako resekcia kamery³ (z angl. *camera resectioning*) je proces odhadovania parametrov modelu dierkovej kamery aproximáciou kamery, pomocou ktorej boli vytvorené obrazové dáta.

Model kamery

Medzi najjednoduchšie možnosti matematického popisu kamery je model dierkovej kamery [2]. Dierková kamera je jednoduchá kamera bez šošovky s malým otvorom (dierkou) na jednej strane. Svetelné lúče zo scény či vzdialeného objektu prechádzajú dierkou a dopadajú na projekčnú plochu, čím premietajú obrátený obraz. V ideálnom prípade je jediným parametrom dierkovej kamery ohnisková vzdialenosť, pretože uvažujeme kameru bez šošovky. Použitie reálnej kamery spôsobuje nutnosť uvažovať okrem ohniskovej vzdialenosti ďalšie parametre.



Obr. 2.2: Schematické znázornenie modelu dierkovej kamery, kde vystupuje projekčná rovina (*Image plane*) a rovina s dierkou (*Pinhole plane*). Zdroj: [2].

Na obrázku 2.2 je znázornená projekcia bodu objektu v priestore na projekčnú rovinu, pričom f je ohnisková vzdialenosť kamery⁴, Z je vzdialenosť objektu od kamery, X je dĺžka objektu a x je obraz objektu na projekčnej rovine [2]. Z podobnosti trojuholníkov môžeme odvodiť rovnicu:

$$-x = f \frac{X}{Z} \quad (2.1)$$

Preusporiadaním a zámenou roviny s dierkou a projekčnej roviny vyššie uvedeného modelu dierkovej kamery, dostávame ekvivalentný model, kde je dierka interpretovaná ako perspektívny stred projekcie. Projekciu bodov z 3D snímaného priestoru do 2D priestoru

³<https://www.mathworks.com/help/vision/ug/camera-calibration.html>

⁴vzdialenosť medzi projekčnou rovinou a rovinou s dierkou

súradnicového systému obrazovej roviny popisujú rovnice 2.2. Parametre c_x a c_y sú parametre posunutia počiatku súradnicového systému projekčnej roviny voči optickej osi, X, Y a Z predstavujú súradnice bodu v 3D priestore a parametre f_x, f_y sú ohniskové vzdialenosti v pixeloch. Dvojica ohniskových vzdialeností sa využíva, kvôli lacným snímačom, ktoré nemusia mať štvorcové, ale obdĺžnikové pixely [2].

$$\begin{aligned}x_s &= f_x \left(\frac{X}{Z} + c_x \right) \\y_s &= f_y \left(\frac{Y}{Z} + c_y \right)\end{aligned}\tag{2.2}$$

Použitie šošoviek u kamier môže spôsobiť dva hlavné druhy deformácie obrazu: radiálne a tangenciálne skreslenie. V dôsledku radiálneho skreslenia sa priame čiary zobrazujú zakrivené, čo je spôsobené tvarom šošovky a jeho účinok sa zvyšuje od stredu obrazu smerom von. Korekcia radiálneho skreslenia pridáva do modelu ďalšie parametre a je popísaná rovnicami 2.3 [2].

$$\begin{aligned}x_c &= x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \\y_c &= y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6)\end{aligned}\tag{2.3}$$

Ku tangenciálnemu skresleniu dochádza, pretože šošovka nie je umiestnená dokonale paralelne s obrazovou rovinou, čo môže spôsobiť, že niektoré oblasti v obraze sa zdajú bližšie než očakávame. Pre korekciu tangenciálneho skreslenia sa používajú nasledujúce rovnice 2.4 [2].

$$\begin{aligned}x_c &= x + [2p_1 xy + p_2(r^2 + 2x^2)] \\y_c &= y + [p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2 xy]\end{aligned}\tag{2.4}$$

Pre správnu korekciu obrazu (tangenciálneho a radiálneho skreslenia) teda potrebujeme uvažovať 5 parametrov, známych ako koeficienty skreslenia⁵ uvedených v rovnici 2.5:

$$D_c = (k_1 \ k_2 \ p_1 \ p_2 \ k_3)\tag{2.5}$$

Tento jednoduchý matematický model dierkovej kamery bol uvedený pre pochopenie základných princípov a nutnosti uvažovať kalibračné parametre. Použitie reálnej kamery znamená nutnosť uvažovať okrem ohniskovej vzdialenosti aj jej ďalšie parametre. Uvažované parametre možno rozdeliť do dvoch skupín:

Vnútorne parametre (z *angl. intrinsic*) sú dané špecifikami konkrétnej kamery a jej výrobcom. Sú to ohniskové vzdialenosti f_x, f_y a parametre c_x, c_y reprezentujúce hlavný bod (*principal point*) na projekčnej rovine.

Vonkajšie parametre (z *angl. extrinsic*) súvisia s polohou a orientáciou kamery v priestore.

⁵poradie koeficientov dané reprezentáciou v OpenCV

2.2.2 Homografia

Homografiu v počítačovom videní definujeme ako mapovanie bodov z jednej roviny na inú. Príkladom homografie môže byť napríklad mapovanie hĺbkových dát zachytených Kinectom do obrazu premietaného projektorom. Homografiu ako mapovanie je možné vyjadriť pomocou násobenia matíc pri použití homogénnych súradníc na vyjadrenie pozorovaného bodu Q a jeho projekcie q [2]. Ak zdefinujeme:

$$\begin{aligned} Q &= [X \ Y \ Z \ 1]^T \\ q &= [x \ y \ 1]^T \end{aligned} \quad (2.6)$$

Následne môžeme vyjadriť činnosť homografie jednoducho, ako to je uvedené v rovnici 2.7. V rovnici je zavedený parameter vyjadrujúci faktor mierky s a matica H vyjadrujúca homografiu:

$$q = sHQ \quad (2.7)$$

Samotná homografia pozostáva z dvoch častí: časť W popisujúca fyzickú transformáciu a časť M vyjadrujúca projekciu, ktorá predstavuje maticu vnútorných parametrov:

$$q = sMWQ \quad (2.8)$$

Maticu vnútorných parametrov (pozri 2.2.1) M môžeme zapísať ako[2]:

$$M = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Časť fyzickej transformácie je súčtom účinkov rotácie R a určitého posunutia t . Pretože pracujeme v homogénnych súradniciach, môžeme ich skombinovať do jednej transformačnej matice:

$$W = [R \ t] \quad (2.10)$$

Kvôli tomu, že pozorované body ležia v jednej rovine pre každý bod platí: $Z = 0$, čo umožňuje zjednodušiť [2] transformačnú maticu $W = [r_1 \ r_2 \ r_3 \ t]$ (zjednodušený zápis⁶) na $W = [r_1 \ r_2 \ t]$.

Rovnicu 2.8 môžeme doplniť o vzťahy popísané v rovniciach 2.9 a 2.10. Dostávame nasledujúcu rovnicu, ktorá predstavuje mapovanie bodov medzi dvomi súradnicovými systémami:

$$\begin{bmatrix} h \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = s \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & t_{13} \\ r_{21} & r_{22} & t_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

2.3 Kinect v1

Kinecty predstavujú radu vstupných zariadení snímajúcich pohyb v 3D priestore, ktoré boli vyvinuté spoločnosťou Microsoft pre sériu herných konzol Xbox 360. Už od počiatku svojho vzniku prinieslo zariadenie Kinect revolúciu v oblasti NUI (Natural User Interface) a

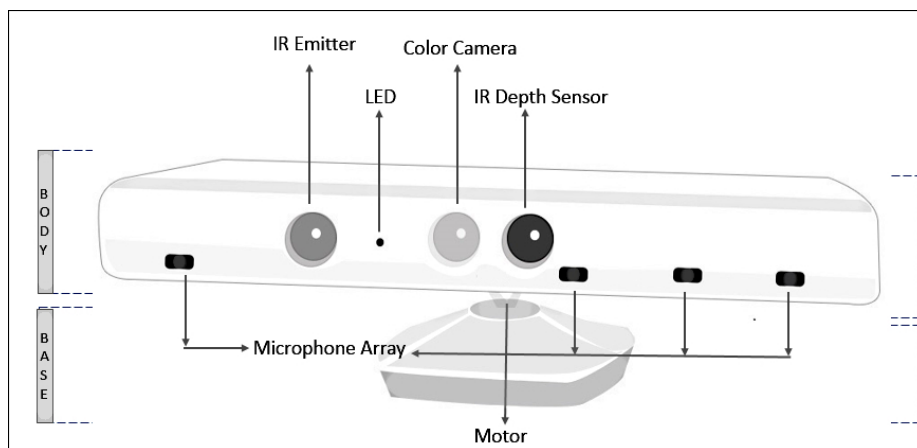
⁶ r_1, r_2, r_3 predstavujú 9 záznamov R (stĺpcové vektory), t vyjadruje trojzložkový vektor

hands-free gamingu. Niet divu, že Kinect sa stal najrýchlejšie predávaným sa elektronickým spotrebitelským zariadením na svete a zapísal sa tým do Guinnessovej knihy rekordov [1]. Prvá generácia týchto zariadení, tzv. *Kinect v1* bola predstavená už v roku 2010 so snahou rozšíriť možnosti užívateľov herných konzol. Jeho oficiálny názov bol "Kinect for Xbox 360".

Toto zariadenie dokáže pomocou pokročilých algoritmov s využitím hĺbkového senzora, farebnej kamery a mikrofónov sledovať pohyby tela, rozpoznávať výraz tváre, ľudský hlas či jednotlivé gestá užívateľa. Jedným z faktorov, ktoré toto elektronické zariadenie odlišujú v bitke s konzolami PlayStation a Wii je práve rozhranie NUI. Užívateľ sa stáva univerzálnym ovládačom pre videohry a aplikácie bez nutnosti použitia tradičných ovládačov.

Charakteristiky dát zachytené Kinectom pritiažli pozornosť výskumníkov z oblasti mapovania a 3D modelovania. Nedávnu demonštráciu potenciálneho využitia Kinectu v oblasti 3D modelovania možno vidieť napríklad v práci [6], pri ktorej výskumníci pomocou Kinectu rekonštruujú 3D scénu a rozširujú ju o dynamický obsah, a mnohých ďalších. Kinect je vďaka svojej cenovej dostupnosti taktiež atraktívnou alternatívou za drahé laserové skenery v aplikačných oblastiach ako je napríklad robotika.

2.3.1 Komponenty



Obr. 2.3: Štruktúra a usporiadanie komponentov zariadenia Kinect v1. Zdroj: [1].

Kinect je horizontálne zariadenie so sadou kooperujúcich komponentov, ktorých rozmiestnenie môžeme vidieť na obrázku 2.3. Všetky tieto komponenty sú umiestnené v malom plochom boxe, upevnenom k motorčeku, ktorý figuruje ako základňa a umožňuje zariadenie nakláňať v horizontálnom smere. Kinect pozostáva z nasledujúcich komponentov:

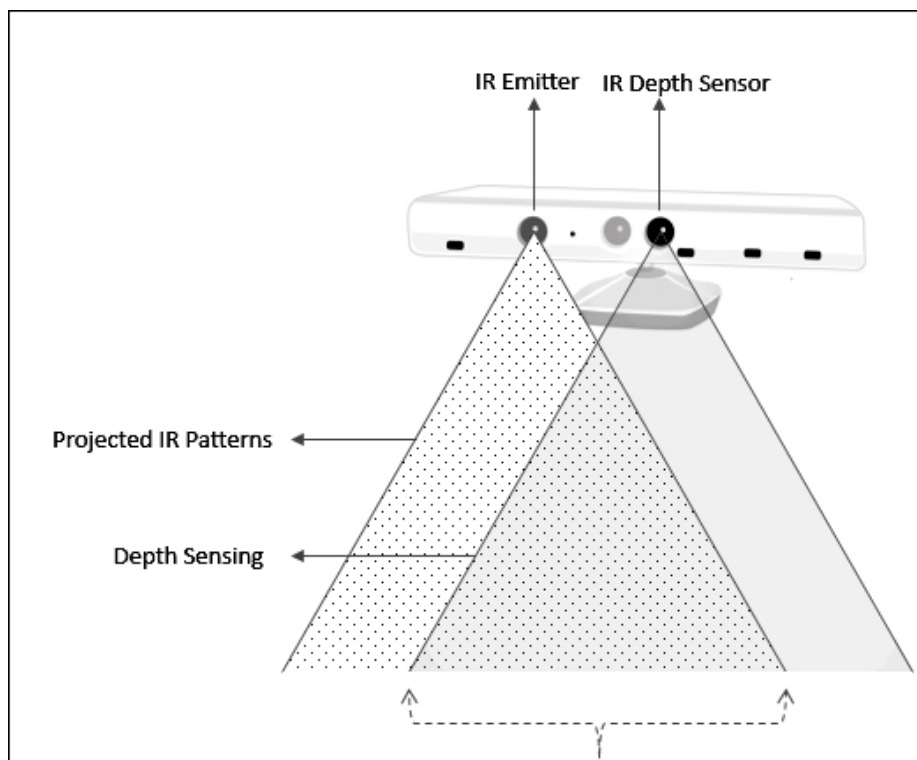
- RGB kamera
- Infračervený (IR) emitör
- IR hĺbkový snímač
- Naklápací motorček
- Mikrofónové pole
- LED dióda

Farebná kamera

Je zodpovedná za snímanie a streamovanie RGB video dát. Dátový tok je sledom statických obrazových snímok a jeho rýchlosť predstavuje 30 snímok za sekundu (FPS) pri rozlíšení 640×480 pixelov. Snímací rozsah kamery je 43 stupňov vertikálne a 57 stupňov horizontálne [1].

IR emitor a IR hĺbkový snímač

Hĺbkový senzor Kinectu pozostáva zo spomínaného infračerveného emitora a infračerveného snímača. Táto dvojica komponentov navzájom spolupracuje, čím umožňuje získať hĺbkové dáta. Funkciou emitora je projekcia infračerveného svetla v pseudonáhodnom bodkovanom vzore. Tieto body nie sme schopní vidieť voľným okom, ale IR snímač ich dokáže zachytiť. Princíp snímania hĺbky môžeme vidieť na obrázku 2.4. Infračervené svetlo sa odráža od objektov, snímač ho zachytáva a prevádza ho na informáciu o hĺbke [1].



Obr. 2.4: Princíp snímania hĺbky a spolupráce IR hĺbkového senzora a IR emitora. Zdroj: [1].

Tok hĺbkových dát je podporovaný v rozlíšení 640×480 pixelov, 320×240 pixelov a 80×60 pixelov a rozsah snímania je rovnaký ako pri farebnej kamere.

Ostatné komponenty

Naklápací motorček používaný na zmenu pozorovacieho uhla kamery a snímača až o 27 stupňov horizontálne v oboch smeroch.

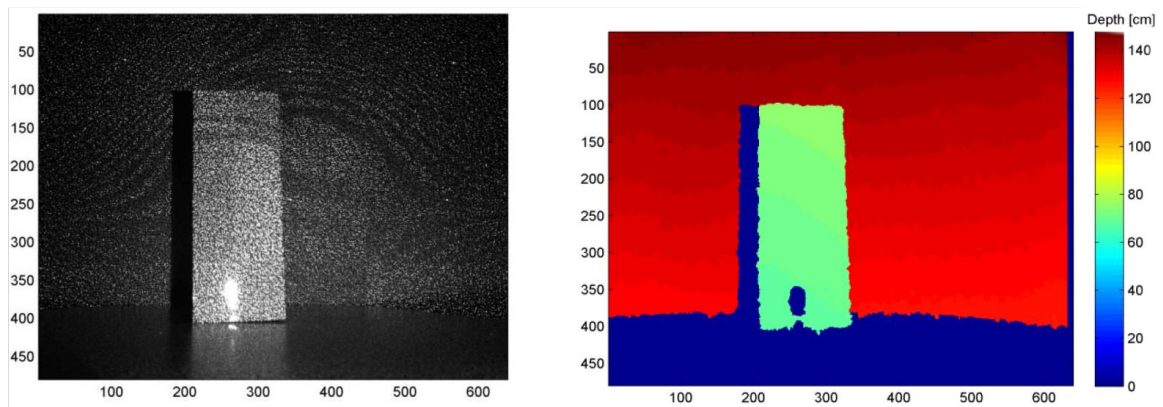
Mikrofónové pole zložené zo štyroch mikrofónov slúži na zachytávanie zvuku a zároveň umožňuje určiť smer, z ktorého prichádza zvuková vlna. Počet mikrofónov zabezpečuje efektívnejšie rozpoznávanie a zachytávanie ľudského hlasu, redukciu šumu a ozveny.

LED dióda indikujúca stav Kinectu, pričom zelená farba indikuje správne načítanie ovládačov [1].

2.3.2 Princíp merania hĺbky trianguláciou

Laserový infračervený emitor vyžaruje jeden lúč, ktorý je rozdelený do viacerých lúčov difrakčnou mriežkou pre vytvorenie konštantného vzoru v podobe bodiek. Ide o technológiu založenú na štruktúrovanom svetle. Tento vzor je premietaný na scénu a jeho odraz je zachytený infračervenou kamerou. Zachytený vzor sa následne koreluje s referenčným vzorom pre získanie disparitného obrazu. Referenčný vzor je uložený v pamäti senzoru, po tom čo sa získa zachytením roviny, ktorej vzdialenosť od senzoru je známa [9].

Pre každý pixel potom môže byť vzdialenosť od senzora vypočítaná z príslušnej disparity. Obrázok 2.5 znázorňuje bodkovaný vzor (z angl. *speckle pattern*) premietaný Kinectom, konkrétne IR emitorom a odpovedajúcu hĺbkovú mapu pre danú scénu.



Obr. 2.5: (a) infračervený obraz bodkového vzoru premietaného na scénu (b) odpovedajúca hĺbková mapa. Zdroj: [9].

Meranie hĺbky sa vykonáva procesom s názvom hĺbková triangulácia, ktorú vyvinuli špecialisti z izraelskej spoločnosti *PrimeSense* [4].

Ako prvé sa získa súbor referenčných vzorov premietnutím vzoru na rovinu v známej vzdialenosti. Kinect senzor používa tri vzory na tri rôzne vzdialené oblasti. Sú to oblasti vo vzdialenostiach 0.8–1.2 m, 1.2–2.0 m a 2.0–3.5 m. Oblasť s najmenšou vzdialenosťou od senzoru má vyššiu presnosť ako tá s najväčšou.

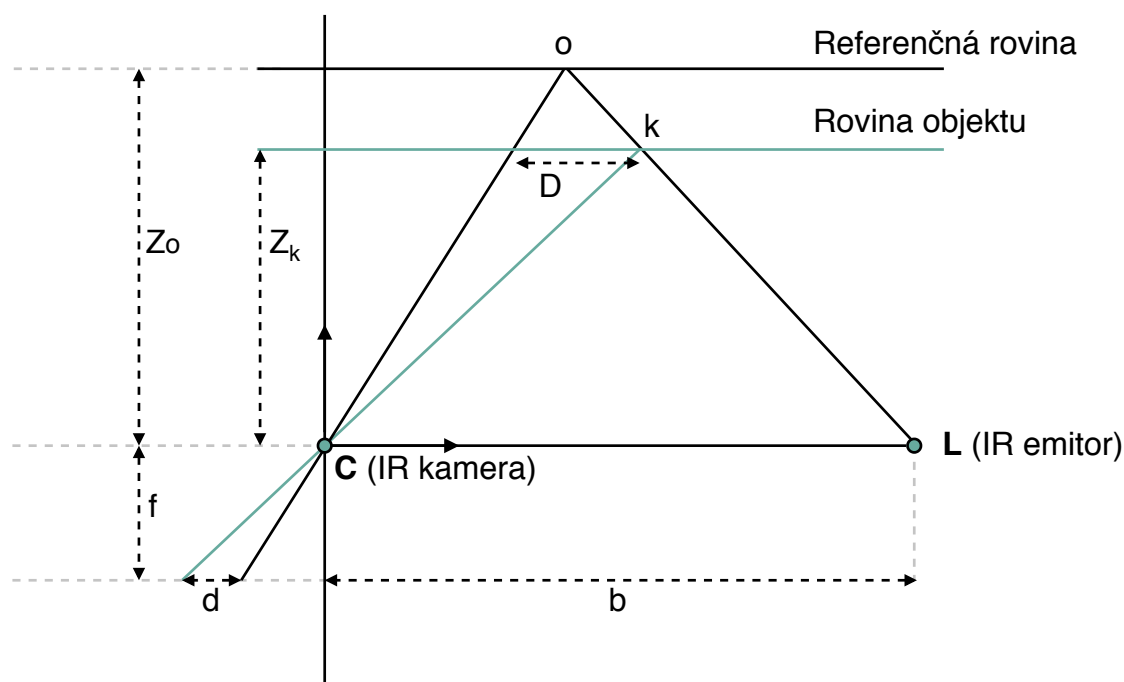
Následne IR emitor premieta tieto vzory do aktuálnej scény v snímacom rozsahu Kinectu. Bodkovaný vzor sa premietne na povrch objektov, ktorých vzdialenosť od snímača je odlišná od vzdialenosti referenčnej roviny. Z tohto dôvodu sa premietané svetelné body zachytené IR kamerou posunú v smere základnej čiary medzi emitorom a perspektívnym stredom kamery [9].

Posuny sa merajú pre všetky svetelné body pomocou použitia korelácie obrazu s referenčnými vzormi na vytvorenie disparitného obrazu, ktorý sa použije na výpočet vzdialenosti každého pixelu od snímača.

Matematický model

Obrázok 2.6 znázorňuje matematický model vysvetlený Khoshelhamom [9], ktorý ilustruje vzťah existujúci medzi vzdialenosťou bodu objektu k od senzoru vzhľadom na referenčnú rovinu a nameranú disparitu d . Za predpokladu, že: uvažujeme súradnicový systém hĺbky, ktorého počiatok je perspektívny stred IR kamery označený ako C ; os Z je ortogonálna k rovine obrazu; os X je kolmá na os Z v smere základnej čiary b ; a os Y je ortogonálna k obidvom z nich, nám vzniká pravotočivý súradnicový systém.

Predpokladajme, že objekt sa nachádza vo vzdialenosti Z_o od referenčnej roviny o a svetelný bod na objekte je zachytený infračervenou kamerou. Ak je objekt posunutý bližšie alebo ďalej od kamery vo vzdialenosti Z_k , umiestnenie svetelného bodu na obrazovej rovine bude posunuté v smere osi X . Posunom bodu po osi X dokážeme zmerať disparitu d .



Obr. 2.6: Schematické znázornenie vzťahu hĺbka-disparita. Obrázok reprodukováný zo zdroja: [9].

Použitím pravidiel o podobnosti trojuholníkov môžeme získať ekvivalencie uvedené v rovniciach 2.12 a 2.13. Uvažujeme nasledujúce označenia, kde b je dĺžka základnej čiary, f je ohnisková vzdialenosť IR kamery, D je posun bodu k v priestore objektu a d je pozorovaná disparita v priestore obrazu. Substitúciou D z rovnice 2.13 do rovnice 2.12 môžeme vyjadriť hĺbku bodu k v scéne označenej ako Z_k . Vyjadrenie Z_k je znázornené v rovnici 2.14.

$$\frac{D}{b} = \frac{Z_o - Z_k}{Z_o} \quad (2.12)$$

$$\frac{d}{f} = \frac{D}{Z_k} \quad (2.13)$$

$$Z_k = \frac{Z_o}{1 + \frac{Z_o}{fb}d} \quad (2.14)$$

Tento matematický model založený na triangulácii nám umožňuje odvodiť hĺbku pixelu z nameranej disparity. Rovinné súradnice možno vypočítať podľa vzťahov uvedených v rovnicách 2.15 a 2.16.

$$X_k = -\frac{Z_k}{f}(x_k - x_o + \delta x) \quad (2.15)$$

$$Y_k = -\frac{Z_k}{f}(y_k - y_o + \delta y) \quad (2.16)$$

Ako vidíme, v tomto matematickom modeli je zahrnutých mnoho kalibračných parametrov: ohnisková vzdialenosť f , korekcia posunu hlavného bodu x_o, y_o , koeficienty skreslenia šošoviek $\delta x, \delta y$, dĺžka základnej čiary b a vzdialenosť k referenčnej rovine Z_o . Tieto parametre sú určené kalibračným procesom, ktorého vysvetlenie presahuje rámec tejto práce, čitateľa môžu nazrieť do článku [9] pre podrobnú analýzu.

2.3.3 Využitie

Pôvodne mienený ako ovládač pre konzolu Xbox, využitie Kinectu postupne presiahlo rámec gaming domény a našiel uplatnenie v širokom spektre oblastí. Zariadenie sa dá okrem pripojenia ku konzole pripojiť k tradičnému počítaču pomocou rozhrania USB. Od začiatku jeho príchodu na trh s ním experimentujú výskumníci, konštruktéri v robotike či animátori na zaznamenávanie pohybu animovaných postavičiek.

Narozdiel od pôvodného Kinectu, Microsoft vytvoril Kinect for Windows, čo je špeciálne navrhnutý hĺbkový senzor zameraný na vyvíjanie aplikácií, ktorý sprostredkúva možnosť vývojárom vytvárať interaktívne aplikácie s využitím v reálnom svete. Jeho príchodom vznikla potreba relevantných zdrojov, ktoré sprostredkujú pochopenie súvisiacich technológií vhodným spôsobom. So vzniknutou potrebou bol preto vytvorený *Kinect for Windows SDK* pre jednoduchý vývoj aplikácií [1].

Existujú viaceré voľne šíriteľné (*open-source*) softvérové balíčky na prácu s hĺbkovými senzormi, pod ktoré patria aj všetky generácie zariadení Kinect. Príkladom môže byť open-source knižnica `libfreenect`⁷, či voľne šíriteľný softvérový balíček *Kinect 3D Video Package 2.5.3*, ktorý využíva aplikácia AR Sandbox.

Niektoré oblasti využitia:

- zdravotníctvo
- robotika
- vzdelávanie
- bezpečnostné systémy
- a iné.

Možnosti, ktoré Kinect ponúka stále nachádzajú uplatnenie v ďalších oblastiach, ale predovšetkým sa využíva na výskumné a vzdelávacie účely. Preto, že bol Kinect vyvinutý primárne na herné účely, jeho presnosť, rýchlosť spracovania a kvalita získaných 3D dát je v mnohých prípadoch nepostačujúca a je nutné použiť iné špecializované hĺbkové senzory.

Využitie nájde aj v našej práci, tým že umožňuje v reálnom čase snímať plochu s pieskom a pomocou 3D nasnímaných hĺbkových dát poskytuje informácie pre aplikáciu AR Sandbox, ktorá komunikuje ako s Kinectom, tak s projektorom.

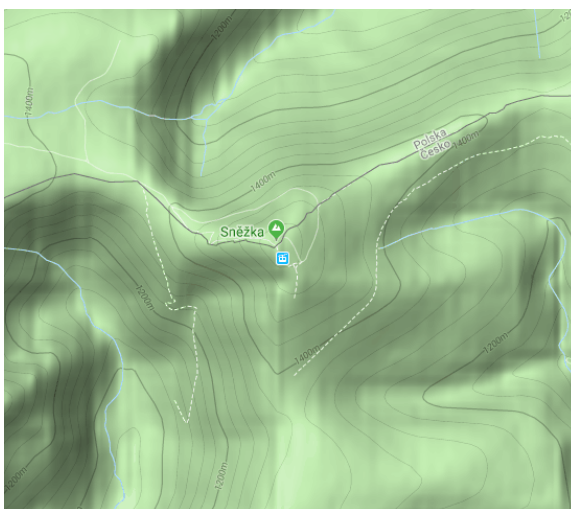
⁷<http://wiki.ros.org/libfreenect>

2.4 Topografia

Topografia je vedecko-technická disciplína, oblasť geovedy, ktorá geografickými a geodetickými metódami skúma a opisuje reliéf, tvary, rozmiestnenie a vlastnosti prírodných a umelých prvkov krajiny. V užšom slova zmysle topografia zahŕňa zaznamenávanie terénu a trojrozmernej kvality povrchu. Zaoberá sa aj metodikou zhotovovania topografických máp a ich klasifikáciou, pričom využíva priame merania v teréne procesom triangulácie a nivelácie [17].

2.4.1 Výšková mapa

Výšková topografická mapa reliéfu je špeciálny typ topografickej mapy, ktorá sa vyznačuje veľkými detailami a kvantitatívnym znázornením reliéfu, zvyčajne pomocou vrstevníc (čiary spájajúcich jednotlivé miesta na mape s rovnakou nadmorskou výškou). Príkladom takejto mapy je ukážka na obrázku 2.7, získaná prostredníctvom terénneho zobrazenia mapy. Výšková mapa určitej geografickej oblasti popisuje nadmorskú výšku v jednotlivých častiach mapy v rozmedzí príslušných zemepisných dĺžok a šírok. Nadmorská výška geografickej polohy je jej výška nad alebo pod pevným referenčným bodom, najčastejšie referenčným geoidom. Referenčný geoid je matematickým modelom morskej hladiny Zeme, ako ekvipotenciálneho gravitačného povrchu [19].



Obr. 2.7: Príklad výškovej topografickej mapy. Obrázok získaný z *googlemaps.com*.

Súvislosť s GIS

Výškové mapy úzko súvisia s geografickými informačnými systémami. GIS alebo geografický informačný systém je počítačový systém, ktorý umožňuje vizualizáciu, manipuláciu a ukladanie dát s príslušnými atribútmi. GIS sprostredkúva lepšie pochopenie modelov a vzťahov krajiny v rôznych mierkach. Nástroje v rámci GIS umožňujú manipuláciu s geografickými dátami pre priestorovú analýzu alebo kartografiu. V geografických informačných systémoch sa zvyčajne používajú digitálne výškové modely (*Digital Elevation Model - DEM*), pre znázornenie povrchu (topografie) miesta pomocou rastrovej množiny dát.

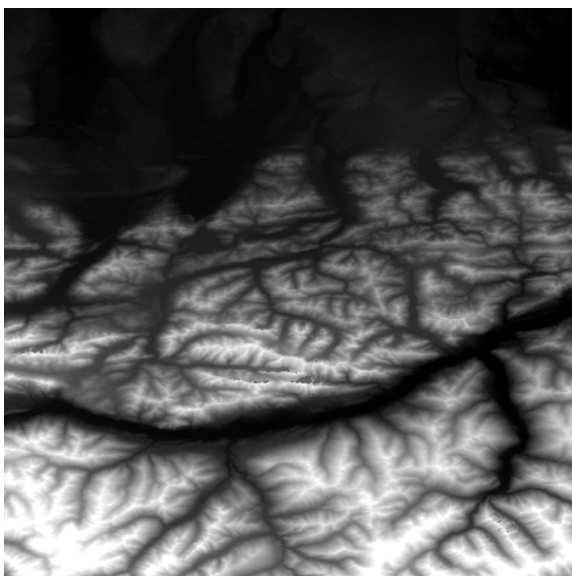
2.4.2 DEM - Digitálny výškový model

Väčšina v súčasnosti dostupných digitálnych výškových dát je výsledkom fotogrametrického zberu dát. Tieto dátové zdroje sa v minulosti spoliehali na stereoskopickú interpretáciu satelitných snímok a leteckých fotografií. S príchodom systému GPS, spolu s jeho rozširujúcim sa využívaním v poľnohospodárstve a v ďalších oblastiach, systém GPS umožnil nové a cenovo dostupnejšie možnosti na získanie veľkého množstva digitálnych výškových dát. V závislosti na tom, z akého zdroja sú dáta získané a aký druh analýzy dát zvolíme, sú výškové dáta zvyčajne reprezentované pomocou troch typov dátových štruktúr. Sú to buď štruktúry s pravidelnou mriežkou, nepravidelné triangulované siete, alebo kontúry [22].

V informatike sa v posledných rokoch najviac využívajú digitálne výškové modely so štvorcovou mriežkou. Najpoužívanejšie sú kvôli ich jednoduchosti reprezentácie, pretože ide o jednoduché výškové matice. Implementácia metód pracujúcich s týmito digitálnymi modelmi je rovnako jednoduchá. Spomenuté výhody so sebou nesú aj nevýhody spojené s pamäťovými nárokmi, efektívnosťou výpočtov a kvalitou získaných výsledkov. Ďalšou nevýhodou je zanedbanie veľkých výškových zmien a vynechanie dôležitých detailov v plochých oblastiach [22].

Napriek tomu, americká vedecká agentúra USGS⁸ (U.S. Geological Survey) získava väčšinu výškových dát v celých metroch, čím zanedbáva určité detaily. Účel použitia týchto dát potom závisí na konkrétnom riešenom probléme.

Digitálne výškové modely sú diskretnými reprezentáciami topografie mapy. Každý digitálny výškový model musí uchovávať všetky body so známymi výškami, čo znamená, že akýkoľvek DEM môže byť transformovaný do množiny bodov zloženého z konečnej množiny súradníc (x, y, z) , pričom x a y sú rovinné súradnice bodu a z je jeho nadmorská výška [19].



Obr. 2.8: Digitálny výškový model. Dáta na základe, ktorých bol obrázok vytvorený boli prevzaté z *usgs.gov*.

Na obrázku 2.8 môžeme vidieť digitálny výškový model z oblasti severných Álp na rakúsko-nemeckej hranici. Hodnoty nadmorských výšok sú reprezentované prechodom z bielej do čiernej farby, pričom belšie miesta vyjadrujú vyššie hodnoty a čierne nižšie hodnoty.

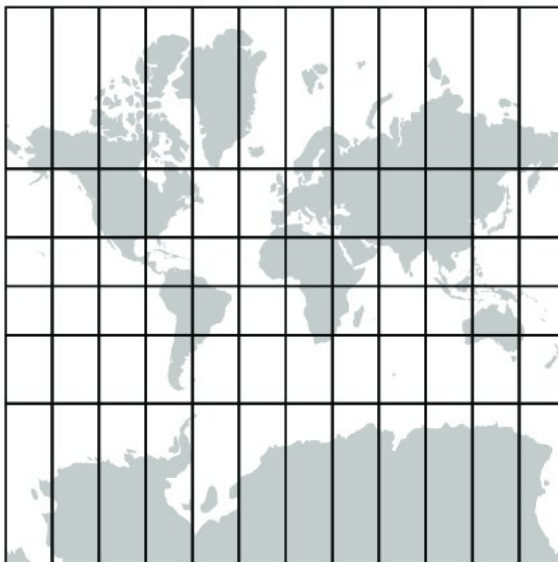
⁸<https://www.usgs.gov/>

Na tomto konkrétnom DEM modeli je maximálna elevácia 2732 m n. m. a minimálna 523 m n. m. Tieto údaje boli zistené pomocou geografického informačného systému QGIS⁹.

2.4.3 Mercatorova projekcia

Na transformáciu sférických a elipsoidných súradníc do euklidovského priestoru bolo v priebehu stáročí opísané veľké množstvo projekcií máp. Vzhľadom k veľkému množstvu dostupných možností je výber vhodnej projekcie netriviálnym problémom a neexistuje riešenie vyhovujúce všetkým potrebám.

Jednou z možností je práve valcová Mercatorova projekcia¹⁰, navrhnutá Gerardusom Mercatorom pôvodne pre námornú navigáciu. Táto projekcia mapuje čiary konštantného uhlového smeru, známe ako loxodrómy, na rovné segmenty, čím vytvára mriežku rovných a kolmých čiar. Projekcia zachováva uhly a nekonečné tvary, čím spôsobuje deformáciu a skreslenie oblastí s narastajúcou mierkou smerom od rovníka k pólom 2.9. Mercatorova projekcia je jedinou projekciou, ktorá je zároveň cylindrickou a konformnou projekciou [7].



Obr. 2.9: Grónsko zaberá na mape s Mercatorovou projekciou toľko priestoru ako Afrika, v skutočnosti je ale 14-krát menšie. Zemepisné šírky nad $\pm 85^\circ$ sú orezané. Zdroj: [7].

Pre mapy, ktoré zobrazujú celú zemeguľu alebo oblasti veľkosti kontinentov, je Mercatorova projekcia nevhodnou voľbou, pretože spôsobuje nasledujúce problémy [7]:

- veľké skreslenie vo vyšších zemepisných šírkach,
- nemožnosť porovnania oblastí a ich vlastností v rôznych zemepisných šírkach kvôli skresleniu,
- nemožnosť zobrazenia celej zemegule kvôli umiestneniu pólom v nekonečnej vzdialenosti od rovníka,
- a ďalšie.

⁹<https://www.qgis.org/>

¹⁰<https://worldwidemarinetraining.com/blog/the-origin-of-the-mercator-projection/>

Mercatorova projekcia má nasledujúce výhody popísané Strebem [20]:

- pri mapách zobrazeným vo veľkých mierkach je relatívne skreslenie menej dôležité a zobrazené tvary vyzerajú správne, pretože projekcia je konformná,
- tým, že je projekcia valcovou projekciou je sever orientovaný stále smerom nahor, tým pádom je aj mapa orientovaná rovnakým spôsobom vo všetkých oblastiach,
- konformita a valcovitosť projekcie zaručuje, že smery svetových strán sú vždy rovnaké bez ohľadu na to na akú časť mapy sa užívateľ pozerá.

Pri mapách zobrazeným vo veľkých mierkach je relatívne skreslenie menej dôležité a zobrazené tvary vyzerajú správne, pretože projekcia je konformná. Tým, že je projekcia valcovou projekciou je sever orientovaný stále smerom nahor, tým pádom je aj mapa orientovaná rovnakým spôsobom vo všetkých oblastiach. Konformita a valcovitosť projekcie zaručuje, že smery svetových strán sú vždy rovnaké bez ohľadu na to na akú časť mapy sa užívateľ pozerá.

Najväčšie webové frameworky, ktoré sa sústreďia na zobrazovanie máp a ich projekciu, napr. *Google Maps* alebo *Bing Maps* od *Microsoftu*, využívajú práve Mercatorovu projekciu. Webové mapy sú založené na predspracovaných rastrových obrázkoch, ktoré sú spájané dohromady na vytvorenie mapy ako celku. Využitie Mercatorovej projekcie predstavuje kompromis medzi spomenutými výhodami a nevýhodami.

Medzi užívateľmi často dochádza k dezinterpretácii mapy v malých mierkach, tzn. ak mapa zobrazuje väčšie oblasti. Príkladom môže byť obrázok 2.9. Webové frameworky sa zameriavajú na užívateľské potreby, ktoré sú zväčša zamerané práve na menšie oblasti s možnosťou 3D zobrazenia.

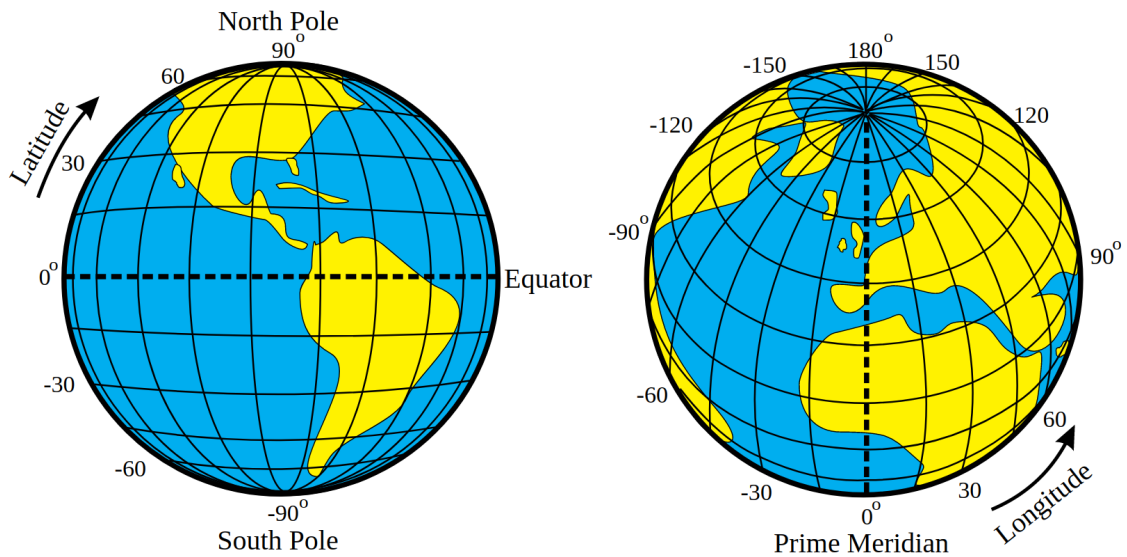
2.4.4 Zemepisná šírka a dĺžka

Najbežnejší spôsob uvedenia pozemskej polohy je pomocou dvoch uhlov, zemepisnej šírky (z angl. *latitude*) a zemepisnej dĺžky (z angl. *longitude*). Táto dvojica uhlov definuje polohu bodu na zemeguli. Presnejšie, definuje polohu bodu na povrchu elipsoidu, ktorý približne odpovedá tvaru zemegule. Preto, aby sme mohli používať zemepisné šírky a dĺžky s istotou, musíme vedieť, akým elipsoidom sa zaoberáme [16].

WGS 84

World Geodetic System 1984 je svetovo uznávaný geodetický štandard, ktorý definuje súradnicový systém, referenčný elipsoid pre kartografiu a geodéziu. Súradnice tohto systému vychádzajú zo zemepisných súradníc, poloha bodu sa teda určuje pomocou zemepisnej dĺžky, šírky a výšky. Tento štandard zahŕňa definíciu základných a odvodených konštánt súradnicového systému spolu s elipsoidným gravitačným modelom Zeme [15].

Vzťah medzi elipsoidom a zemepisnými súradnicami je jednoduchý (pozri obrázok 2.10). Čiary konštantnej zemepisnej dĺžky spájajúce severný a južný pól po povrchu elipsoidu sú známe ako poludníky a čiary konštantnej zemepisnej šírky v smere východ-západ poznáme ako rovnobežky. Zemepisná dĺžka bodu na elipsoide je vyjadrená uhlom medzi poludníkom, ktorý týmto bodom prechádza a nultým poludníkom. Dĺžka naberá hodnoty uhlov $\pm 180^\circ$ smerom na východ a západ od nultého poludníka. Zemepisná šírka bodu je uhol medzi rovníkom a k nemu rovnobežnou priamkou prechádzajúcu týmto bodom. Šírka naberá hodnoty uhlov $\pm 90^\circ$ na sever a juh od rovníka [16].



Obr. 2.10: Zemepisná šírka a dĺžka a rozpätie ich uhlových hodnôt vzhľadom na nulový poludník (*prime meridian*) a rovník (*equator*). Zdroj: [18].

2.4.5 Haversine vzorec

Pre výpočet vzdialenosti medzi dvoma bodmi na mape, ktoré sú dané zemepisnými súradnicami, dĺžkou a šírkou, sa využíva tzv. Haversine vzorec. V minulosti sa využíval najmä v navigácii a dnes je veľmi populárny a často sa používa pri vývoji GIS aplikácií. Vzorec medzi dvoma bodmi určuje ortodrómu – najkratšiu spojnicu dvoch bodov na guľovej ploche. Ide o špeciálny prípad všeobecnejšieho vzorca¹¹ známeho v guľovej trigonometrii. Haversine neuvažuje zakrivenie Zeme do elipsoidu ani nadmorské výšky, počíta so Zemou ako s dokonalou guľovou plochou [21].

Princíp výpočtu vzdialenosti medzi dvoma bodmi využitím Haversine vzorca je daný nasledujúcimi rovnicami 2.17 až 2.22 [8].

Nech Θ je stredový uhol medzi dvoma bodmi, d je najkratšia vzdialenosť medzi bodmi (ortodróma) a r je polomer Zeme, potom platí:

$$\Theta = \frac{d}{r} \quad (2.17)$$

Uvažujme nasledujúce označenia, kde ϕ_1, ϕ_2 sú zemepisné šírky dvoch bodov a λ_1, λ_2 ich zemepisné dĺžky. Haversine vzorec h stredového uhla Θ je následne vyjadrený rovnicou:

$$h(\Theta) = h(\phi_2 - \phi_1) + \cos(\phi_1) \cdot \cos(\phi_2) \cdot h(\lambda_2 - \lambda_1) \quad (2.18)$$

Vzorec môžeme vyjadriť pomocou goniometrickej funkcie sínus takto:

$$h(\theta) = \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (2.19)$$

¹¹<https://www.revolvy.com/page/Spherical-law-of-cosines>

Na základe ekvivalencie uvedenej v 2.19 je možné odvodiť nasledujúce rovnice pre výpočet vzdialenosti d medzi dvomi bodmi:

$$a = \sin^2\left(\frac{\phi_2 - \phi_1}{2}\right) + \cos(\phi_1) \cdot \cos(\phi_2) \cdot \sin^2\left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2}\right) \quad (2.20)$$

$$c = 2 \cdot \operatorname{atan2}(\sqrt{a}, \sqrt{1-a}) \quad (2.21)$$

$$d = r \cdot c \quad (2.22)$$

2.5 AR Sandbox

Aplikácia Augmented Reality Sandbox je výsledkom projektu financovaného organizáciou NSF (National Science Foundation) v rámci neformálneho vedeckého vzdelávania v oblasti výskumu sladkovodných jazier a povodí v rámci podpory vzdelávania. Projekt využíva kombináciu 3D vizualizácie s fyzickým exponátom obsahujúcim piesok na vyučovanie konceptov týkajúcich sa vied o Zemi (topografia, hydrológia, atď.). Na vytvorení sa podieľali okrem W.M. Keckovho centra pre aktívnu vizualizáciu v oblasti vied o Zemi (KeckCAVES¹²), mnohé ďalšie výskumné a vedecké strediská [10].

AR Sandbox v doslovnom preklade znamená Pieskovisko s rozšírenou realitou. Pretože slovo *pieskovisko* je dosť obskurné, budeme používať anglické synonymum *sandbox*. AR Sandbox umožňuje užívateľom vytvárať topografické modely tvarovaním skutočného piesku, ktorý je v reálnom čase aplikačne rozšírený o výškovú farebnú mapu, topografické vrstevnice a algoritmicky simulovanú vodu.

Pomocou tohto systému je možné edukovať jednotlivcov v oblasti geografie, geológie a hydrológie. Rovnako učí ako čítať topografickú mapu, pochopiť význam vrstevníc, povodí, hrádzí a pod. Medzi hlavné ciele tohto projektu patrí vytvorenie integrovaného systému s rozšírenou realitou na vytváranie topografických modelov v reálnom čase a pozdvihnutie všeobecného povedomia o sladkovodných ekosystémoch [10].

Aplikácia je závislá na dvoch softvérových balíčkoch, ktorými sú VR Vrui toolkit 2.5.2 a Kinect 3D VideoPackage 2.5.3.

2.5.1 DEM Tool

Aplikáciu AR Sandbox je možné používať v dvoch rôznych módoch. Prvým z nich je základný mód pre vykresľovanie topografickej mapy, ktorý sprostredkúva pre užívateľa základnú interaktivitu s pieskom a možnosť interakcie so simulovanou vodou.

Druhý mód s názvom DEM Tool spočíva v navádzaní užívateľa pri modelovaní mapy farebným odlíšením. Na základe farebného odlíšenia je užívateľ navádzaný, kde treba piesok pridať (červená) a kde ubrať (modrá). DEM Tool nepodporuje štandardné formáty geografických dát, ale pracuje s DEM modelmi uloženými v jednoduchom formáte *grid*.

DEM modely v tomto formáte nie sú dostupné, pretože ide o vnútornú reprezentáciu aplikácie AR Sandbox, čo spôsobuje problém. V dôsledku toho mód nie je pre bežného užívateľa použiteľný, pretože aplikácia neposkytuje možnosť vytvorenia týchto súborov. Tento problém rieši vytvorený rozširujúci modul, ktorý v rámci výberu konkrétnej mapy pre modelovanie, konvertuje súbory reprezentujúce DEM modely v štandardnom formáte do formátu *grid* a tým umožňuje DEM Tool použiť.

¹²<http://keckcaves.org>

Formát grid

Formát grid (mriežka) je jednoduchý formát, v ktorom sú uložené DEM modely pre načítanie do aplikácie AR Sandbox v móde DEM Tool. Formát je binárny s poradím bajtov little-endian [11].

Na obrázku 2.11 môžeme vidieť jeho grafické znázornenie. Prvé dve položky sú uložené ako 32-bitové celé čísla (*int*). Udávajú počet stĺpcov a riadkov, a reprezentujú rozlíšenie DEM modelu.

Nasledujúce 4 položky reprezentujú priestorové rozsahy DEM modelu vo forme ohraničujúceho obdĺžnika (z angl. spatial extents (SE)). Sú uložené ako 32-bitové čísla s plávajúcou desatinnou čiarkou (*float*). Za nimi nasleduje príslušný počet výškových hodnôt uložených ako predošlé hodnoty (*float*). Ich počet závisí na počte riadkov a stĺpcov. Hodnoty priestorových rozsahov a výšok musia byť uložené v rovnakých jednotkách (napr. v metroch), aby nebol DEM model vertikálne skreslený [11].

Počet stĺpcov a riadkov musí byť v pomere 4:3 pre správne namapovanie súboru do súradnicového systému sandboxu (ktorého rozmery sú tiež v pomere 4:3). Celkové rozlíšenie (*cols*×*rows*) je obmedzené rozlíšením Kinectu, preto by nemalo presiahnuť 640×480 pixelov.

cols	rows	SE _{left}	SE _{bottom}	SE _{right}	SE _{top}	elevation ₁	...	elevation _{cols*rows}
------	------	--------------------	----------------------	---------------------	-------------------	------------------------	-----	--------------------------------

Obr. 2.11: Grafické znázornenie formátu *grid*

2.5.2 VR Vrui Toolkit

VR (Virtual Reality) Vrui toolkit¹³ je voľne šíriteľný softvér založený na multiplatformnom aplikačnom programátorskom rozhraní OpenGL, implementovaný v jazyku C++. Jeho hlavnou úlohou je oddeliť vývojárov od príslušnej konfigurácie VR prostredia takým spôsobom, že vysoko interaktívne aplikácie s virtuálnou realitou môžu byť vyvíjané rýchlo a v prenositeľnom formáte.

Je určený na podporu implementácie plne škálovateľných a prenositeľných aplikácií, ktoré fungujú v rôznych VR prostrediach, počnúc notebookom s touchpadom, cez desktopové počítače so špeciálnymi vstupnými zariadeniami, až po plnohodnotné VR prostredie (napr. CAVE¹⁴).

Formát inputgraph

Súbory vo formáte *inputgraph* využívajú aplikácie implementované nad VR Vrui toolkitom pre určenie istých nastavení a ovládania. Inputgraph slúži na zviazanie (z angl. *binding*) tlačidiel klávesnice a myši s príslušnými funkciami v rámci danej aplikácie. Rozlišujú sa základné¹⁵ (spoločné pre všetky aplikácie nad Vrui) a špecifické nastavenia (pre konkrétnu aplikáciu).

Pre aplikáciu AR Sandbox inputgraph sprostredkuje spôsob načítania grid súboru, nastavenie hodnôt mierky a vertikálneho posunu a následné prepnutie do módu DEM Tool

¹³<http://idav.ucdavis.edu/~okreylos/ResDev/Vrui/>

¹⁴<http://idav.ucdavis.edu/~okreylos/ResDev/KeckCAVES/index.html>

¹⁵napr. zobrazenie hlavného menu Vrui po kliknutí pravého tlačidla myši

odpovedajúcim tlačidlom (napr. *t*). Umožňuje použiť aj ďalšie nastavenia, napr. tlačidlo pre odstránenie simulovanej vody z priestoru sandboxu a pod.

2.5.3 Kinect 3D Video Package

Kinect 3D Video Package¹⁶ predstavuje softvérový balíček na prácu a prepojenie Kinectu s bežným užívateľským počítačom. Balíček umožňuje využiť Kinect ako 3D kameru pre rôzne aplikácie súvisiace s 3D grafikou a virtuálnou realitou. Je implementovaný ako súbor aplikácií založených na VR Vruí toolkitu a uľahčuje využívanie hĺbkových dát z Kinectu.

Skladá sa z niekoľkých tried, ktoré zapuzdrujú aspekty knižnice `libusb` do C++ rámca a z ďalších tried, ktoré zapuzdrujú riadenie farebnej a hĺbkovej kamery Kinectu, spolu s operáciami potrebnými na projekciu kombinovaného toku hĺbkových a farebných dát. Zároveň obsahuje niekoľko pomocných aplikácií, vrátane jednoduchého nástroja na kalibráciu.

¹⁶<http://idav.ucdavis.edu/~okreylos/ResDev/Kinect/index.html>

Kapitola 3

Realizácia systému AR Sandbox

Tým, že sme sa rozhodli použiť aplikáciu AR Sandbox ako základ našej práce, bola nutná realizácia systému, v rámci ktorého je aplikácia použitá. Na základe požiadaviek bol zrealizovaný funkčný systém pozostávajúci z jednotlivých hardvérových komponentov a nainštalovaného softvéru.

3.1 Hardware

Na zhotovenie funkčného systému s aplikáciou AR Sandbox sú vyžadované nasledujúce hardvérové komponenty [12]:

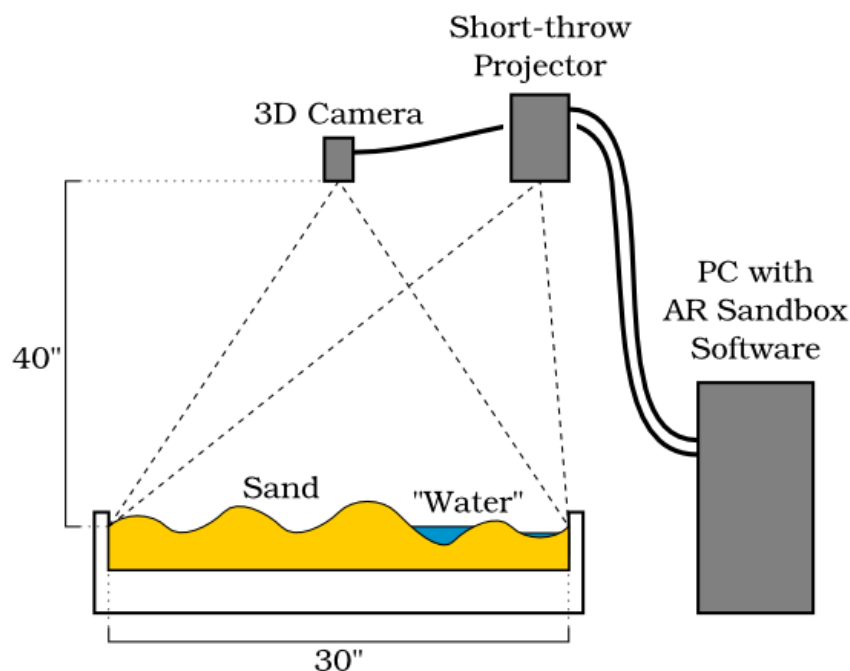
- počítač s grafickou kartou a s operačným systémom Linux,
- hĺbkový senzor Kinect,
- digitálny videoprojektor s rozhraním HDMI,
- sandbox s možnosťou uchytenia Kinectu a projektora,
- piesok.

Obrázok 3.1 predstavuje typické rozloženie: projektora, Kinectu, sandboxu a počítača s nainštalovanou aplikáciou. Obe zariadenia sú pripojené k počítaču prostredníctvom odpovedajúcich rozhraní. Kinect je pripojený pomocou rozhrania USB a projektor pomocou HDMI.

3.1.1 Počítač

Ideálnym počítačom pre aplikáciu AR Sandbox je dedikovaný počítač s operačným systémom Linux. Počítač by mal disponovať aspoň 2-jadrovým procesorom. Pre spustenie a bezproblémový beh softvéru AR Sandbox postačuje RAM s veľkosťou 2 GB. Kľúčovou podmienkou je grafická karta Nvidia GeForce (triedy vyššej ako GTX 960 2 GB) potrebná na simuláciu vody (ak by mal užívateľ záujem iba o vykresľovanie topografickej mapy stačila by mu aj menej výkonná grafická karta). Aplikácia spolu s nainštalovaným operačným systémom nezaberá viac ako 20 GB diskového priestoru [12].

Aplikáciu som zrealizoval na dedikovanom počítači so štvorjadrovým procesorom, 8GB RAM pamäťou a grafickou kartou Nvidia GeForce GTX 980, ktorá umožňuje plynulú simuláciu vody.



Obr. 3.1: Znáznornenie usporiadania a umiestnenia hardvérových komponentov. Zdroj: [12].

3.1.2 Hĺbkový senzor

Výber hĺbkového senzoru závisí na jeho dostupnosti a cene. AR Sandbox umožňuje použiť jeden z dvojice Kinectov, Kinect v1 alebo Kinect v2, ktoré sa líšia technológiou získavania hĺbkových dát a rozlíšením. Princíp získavania dát Kinectom v1 je opísaný v kapitole 2.3. Kvôli dostupnosti oboch zariadení som sa rozhodol použiť Kinect v1.

Kinect musí byť umiestnený v dostatočnej výške v strede nad povrchom piesku, tak aby pokrýval priestorové rozmery sandboxu. Na správne umiestnenie bol použitý program `RawKinectViewer` z balíčka 2.5.3, ktorý v reálnom čase zobrazuje hĺbkový a farebný dátový tok.

3.1.3 Projektor

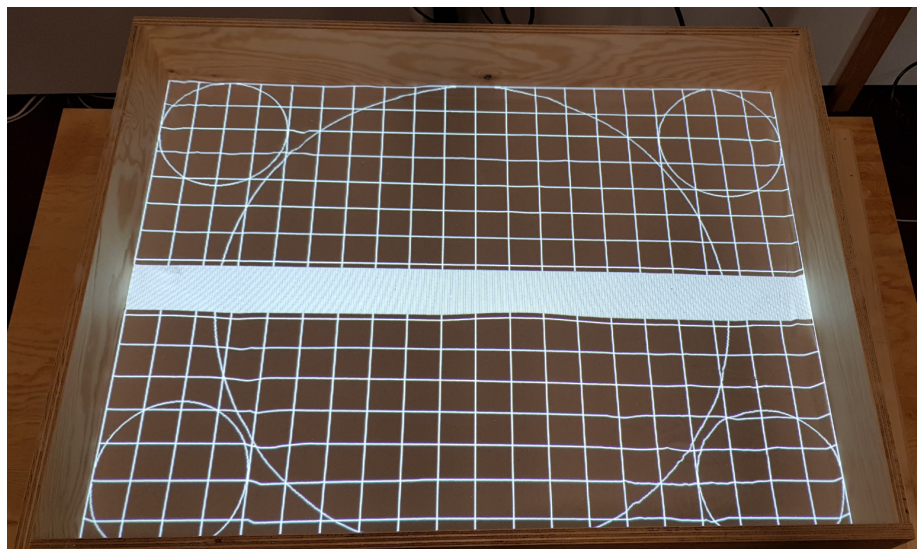
Podľa špecifikácie je vhodným projektorom na realizáciu projektor s natívnym rozlíšením v pomere 4:3 s rozhraním HDMI¹. Analógové pripojenie pomocou VGA portu môže spôsobiť degradáciu obrazu a vychýlenie medzi obrazom a povrchom piesku. Postačujúce rozlíšenie projektoru je 1024×768 [12].

Použili sme projektor s krátkou projekčnou vzdialenosťou s požadovaným natívnym rozlíšením. To umožnilo vertikálne posunutie Kinectu a projektoru, čím sa zvýšila kompaktnosť celého systému.

Pre správne určenie kalibrácie a vykresľovanie topografickej mapy bolo nutné presné umiestnenie projektoru a prispôbenie obrazu, tak aby obraz vyplňal interiér sandboxu. To môžeme vidieť na obrázku 3.2. Za týmto účelom bola použitá kalibračná mriežka vykreslená nástrojom `XBackground` z balíčka `Vrui` 2.5.2. Na základe zarovnania mriežky s interiérom

¹eventuálne s rozhraním DisplayPort

sandboxu bolo upravené umiestnenie projektoru do výšky približne 62cm a jeho obraz bol počas procesu zarovňavania upravovaný korekciou lichobežníkového skreslenia.



Obr. 3.2: Premietaná kalibračná mriežka nástrojom XBackground v interiéri sandboxu.

3.1.4 Sandbox

Samotný sandbox, by mal rovnako zachovávať pomer strán v pomere 4:3, aby jeho priestorové rozmery zodpovedali snímaciemu rozpätiu Kinectu a premietanému obrazu projektoru. Jeho veľkosť je limitovaná minimálnou a maximálnou snímacou vzdialenosťou Kinectu [12].

Odporúčané rozmery sandboxu sú 1m na 0.75m. V takom prípade je umiestnenie Kinectu približne vo výške 1m nad sandboxom. V tejto výške má Kinect dostatočné vertikálne a horizontálne rozlíšenie, pričom so zväčšujúcimi sa rozmermi sandboxu rozlíšenie klesá.

Pre konštrukciu sandboxu bolo použité podnožie (s nosnosťou do 150kg), na ktorom je upevnená základná doska. Na dosku bola uchytená obdĺžniková konštrukcia (z 2 kratších a z 2 dlhších dosiek), ktorá predstavuje ohraničujúci priestor, do ktorého sa pridala piesok.

3.1.5 Piesok

Piesok je jednou z dôležitých súčastí celej realizácie. Vďaka piesku užívateľ zažije zaujímavú skúsenosť pri tvarovaní piesku do tvaru kopcov, údolí a vodných nádrží.

Dostatočné naplnenie sandboxu pieskom by malo zodpovedať výške okolo 10cm. Pri rozmeroch 1m na 0.75m to odpovedá objemu 75 litrov, pričom váha piesku je približne 100kg.

V rámci realizácie sme sa rozhodli použiť biely akvariný piesok s malou zrnitosťou, ktorý má vyhovujúce projekčné vlastnosti. Pre modelovanie vrchovatých oblastí je nutné piesok navlhčiť vodou a tým redukovať jeho sypkosť.



Obr. 3.3: Zrealizovaný systém AR Sandbox s Kinectom, projektorom a sandboxom s pieskom.

3.2 Rovnica základnej roviny

Pre správne fungovanie aplikácie, módu DEM Tool a určenie kalibrácie je potrebné zistiť rovnicu popisujúcu základnú rovinu sandboxu. Táto rovnica je určená na základe polohy Kinectu pomocou nástroja `RawKinectViewer`. Pred získaním tejto rovnice je nutné vyrovnať povrch piesku na rovinnú plochu. Dokonalé vyrovnanie povrchu do roviny nie je možné, preto bol pre získanie rovinatej plochy použitý kus kartónu položený na okrajových doskách sandboxu. Tým, že je kartón posunutý bližšie ku kamere v porovnaní s rovinou na ktorej leží piesok, je nutné upraviť offset rovnice po vertikálnej osi tak, aby rovnica popisovala rovinu dna sandboxu. Vypočítaná rovnica sa následne uloží do textového súboru `BoxLayout` s ktorým pracuje AR Sandbox.

Do súboru sa ukladajú koeficienty roviny (v zápise 3.1) pozostávajúce z normálového vektora roviny a, b, c a offsetu d , pričom rovnica roviny je $ax + by + cz + d = 0$.

$$\langle \text{vektor} \rangle, \langle \text{offset} \rangle \quad (3.1)$$

Spolu s rovnicou sa zisťuje štvorica rohových bodov sandboxu, ktoré sa uložia za rovnicu základnej roviny do textového súboru. Tieto body sú potrebné pre správnu funkčnosť simulácie vody a módu DEM Tool. Získavajú sa rovnako pomocou nástroja `RawKinectViewer` využitím funkcie `Measure 3D positions`, ale tentokrát bez použitia kartóna priamo z povrchu piesku.

3.3 Kalibrácia

V aplikácii AR Sandbox je nutné uvažovať a pracovať so súradnicovými systémami nasledujúcich zariadení:

- Projektor
- Kinect (hĺbkový dátový tok)

Pre správne fungovanie aplikácie ako celku, je nutné tieto súradnicové systémy voči sebe kalibrovať. Proces kalibrácie zabezpečuje správne namapovanie premietaného 2D obrazu projektoru na hĺbkové dáta z Kinectu.

3.3.1 Kalibrácia kamery

Kalibrácii medzi projektorom a Kinectom predchádza kalibrácia kamery a získanie jej vnútorných parametrov. Po zapojení Kinectu do počítača boli pomocou programu `getCalib` zo softvérového balíčka `Kinect 3D Video Package` stiahnuté vnútorné kalibračné parametre priamo z jeho firmvéru.

Hĺbkový senzor Kinectu v1 má určité nelineárne skreslenie hĺbky. To znamená, že ak senzor sníma rovinný povrch, 3D rekonštrukcia nebude plochá ale mierne zaobleného tvaru. Toto skreslenie môže zapríčiniť nepresné zarovnanie medzi fyzickým povrchom piesku a projekciou topografickej mapy [13]. Pre pixelovú korekciu (*per-pixel correction*) tohto skreslenia bol použitý vstavaný kalibračný nástroj programu `RawKinectViewer`, ktorým sa zvýšila kvalita výsledného zobrazenia.

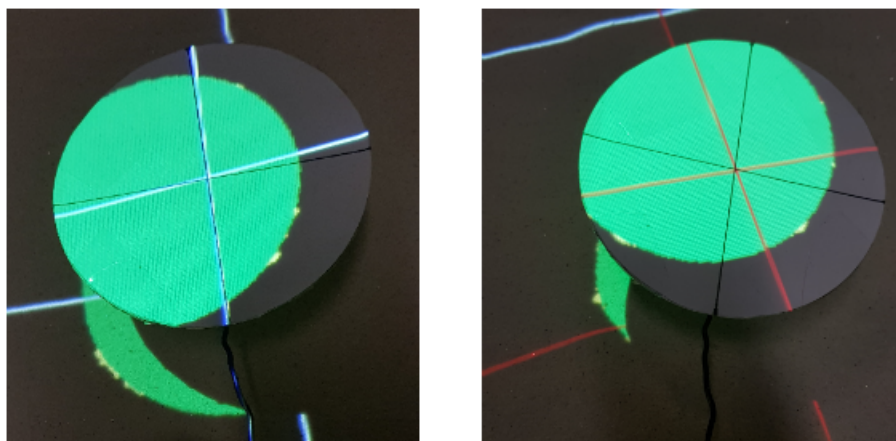
3.3.2 Kalibrácia medzi projektorom a Kinectom

Princíp kalibrácie medzi projektorom a Kinectom spočíva v odhade projekčnej matice P , ktorá konvertuje 3D súradnice v priestore sandboxu do 2D súradníc v priestore obrazu projektora. Predpokladajme, že (x, y, z) je bod v priestore sandboxu, P je 3x4 projekčná matica a (h, v) je bod v priestore obrazu, potom platí:

$$(h, v, 1) = P * (x, y, z, 1) \quad (3.2)$$

Kalibráciou sa zachytáva množina väzbových bodov (*z angl. tie points*), ktorých (h, v) sú známe. Tieto body ležia na priesečníkoch vykreslených ortogonálnych čiar nástrojom `CalibrateProjector`. Body (x, y, z) sa merajú hĺbkovým senzorm, konkrétne umiestnením kalibračného disku do plochého zhluku bodov pre výpočet jeho stredového bodu. Vzhľadom na množinu meraní $N(h_i, v_i, x_i, y_i, z_i)$ systém vytvára rozsiahly systém lineárnych rovníc, ktorým sa vypočíta 12 neznámych vstupov matice P . Z každého väzbového bodu získame len dve rovnice, takže predtým ako je možné riešiť P potrebujeme najmenej 6 väzbových bodov.

Na kalibráciu bol použitý nástroj `CalibrateProjector`, pri použití ktorého, sme využili vyhotovený kalibračný disk (CD s drôtikom). Použitie drôtika na kalibračnom disku umožňuje jeho detekciu, tým že je zhluk bodov oddelený od ruky, ktorou ho držíme. Kalibračný disk môžeme vidieť na obrázku 3.4 pri procese kalibrácie a po kalibrácii.



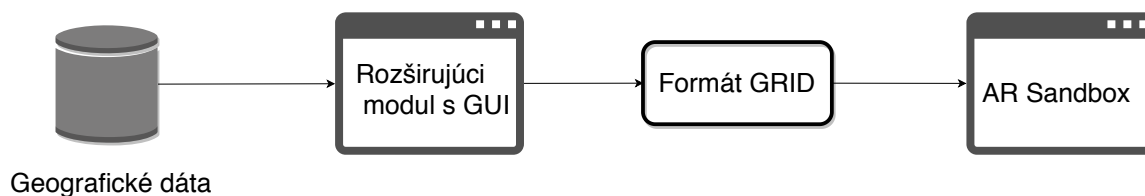
Obr. 3.4: Proces získavania *tie-points* kalibračným diskom (vľavo), mapovanie priesečnickov čiar po kalibrácii (vpravo).

Kapitola 4

Návrh riešenia

V tejto kapitole je popísaný návrh a prepojenie rozširujúceho modulu na výber mapy s aplikáciou AR Sandbox. Návrh modulu, ktorý rozširuje pôvodnú aplikáciu AR Sandbox o možnosť výberu konkrétnej mapy spočíva vo vhodnom výbere typu aplikácie a vyžaduje dobré pochopenie potrieb používateľov. Na začiatku návrhu boli identifikované základné časti výsledného systému. Bola vymedzená ich činnosť a definované vstupy a výstupy. Hlavným cieľom rozširujúceho modulu je umožnenie užívateľovi vybrať si špecifickú časť mapy prostredníctvom grafického užívateľského rozhrania a následne jednoduché spustenie aplikácie AR Sandbox so súborom reprezentujúcim vybranú mapu. Návrh riešenia popisuje dátový tok medzi jednotlivými časťami modulu a aplikácie AR Sandbox. Pojednáva o funkčných požiadavkách na GUI aplikácie a procesoch konverzie DEM súborov.

4.1 Základná myšlienka



Obr. 4.1: Data-flow navrhutej architektúry.

Základná myšlienka spočíva vo vytvorení aplikácie, ktorá pomocou grafického užívateľského rozhrania komunikuje s užívateľom. Aplikácia musí byť schopná získavať a využívať geografické dáta, ktoré sa použijú na vytvorenie súboru vo formáte *grid*. Súbory v tomto formáte sú následne integrovateľné do aplikácie AR Sandbox, ktorá s nimi vie pracovať pomocou modelovacieho módu DEM Tool.

V každom vzťahu medzi jednotlivými prvkami navrhutej architektúry na obrázku 4.1 vzniká rada problémov, ktoré je nutné riešiť a podrobnejšie sa im budeme venovať v nasledujúcich sekciách.

4.2 Problémy

Identifikované problémy medzi vzťahmi jednotlivých uvažovaných častí na obrázku 4.1 sú nasledujúce:

- vo vzťahu *Geografické dáta – Rozširujúci modul s GUI*:
 - výber vhodného modelu geografických dát,
 - problém získavania dát,
 - problém uchovávanania dát,
- vo vzťahu *Rozširujúci modul s GUI – Formát GRID*:
 - problém zachovania pomeru strán (prispôsobenie výberového okna vzhľadom na uvažované projekcie),
 - problém s úpravou mierky výškových hodnôt a vertikálneho posunu DEM modelu.
- vo vzťahu *Formát GRID – AR Sandbox*:
 - predanie výsledného súboru aplikácii AR Sandbox.

4.3 Geografické dáta

Súčasťou návrhu aplikácie je použitie relevantných geografických dát. Hlavnou požiadavkou navrhnutého modulu je konverzia DEM súboru vo formáte GeoTIFF do formátu grid. Dáta s ktorými modul pracuje predstavujú výškové mapy. Tieto mapy sú v geografických informačných systémoch reprezentované pomocou digitálnych výškových modelov DEM (podrobnejšie v sekcii 2.4.2).

Existujú viaceré verejne dostupné DEM modely, napríklad GTOPO30, SRTM DEM či ASTER GDEM a pod. GTOPO30¹ je celosvetový voľne dostupný DEM, ale jeho kvalita a rozlíšenie sa v rôznych oblastiach líši a v niektorých oblastiach je rozlíšenie veľmi nízke (pri veľkých mierkach mapy je nepoužiteľný), preto sme sa rozhodli ho nepoužiť. SRTM DEM a ASTER GDEM modely majú vyhovujúce pokrytie a rozlíšenie vo všetkých oblastiach.

Na obrázku 4.2 môžeme vidieť porovnanie rozlíšení týchto modelov. Rozlíšenie SRTM je na prvý pohľad vyššie. Oba spomínané DEM modely sú pre účely našej aplikácie použiteľné. Pre vytvorenie súboru vo formáte grid ale nepožadujeme tak vysoké rozlíšenie ako má SRTM. Kvôli úspore diskového priestoru, rýchlejšiemu sťahovaniu a stále postačujúcemu rozlíšeniu som sa rozhodol využiť práve ASTER GDEM dáta.

4.3.1 ASTER Global DEM

ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) Global DEM je celosvetový digitálny výškový model, ktorý zverejnila americká organizácia NASA v spolupráci s japonskou štátnou organizáciou METI. Je výsledkom priameho diaľkového snímania zemského povrchu z obežnej dráhy [14].

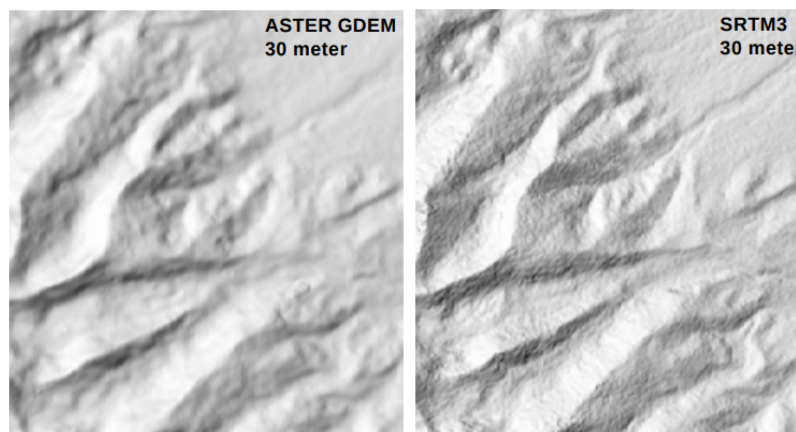
Pokrýva zemský povrch siahajúc od severnej zemepisnej šírky po južnú v rozsahu $\pm 83^\circ$. Skladá sa z 22600 častí, pričom každá časť reprezentuje štvorcový DEM v rozmedzí $1^\circ \times 1^\circ$

¹http://www.webgis.com/terr_world.html

zemepisnej šírky a dĺžky. Jednotlivé časti DEM sú vo formáte GeoTIFF so súradnicami zemepisnej šírky a dĺžky vzťahujúcim sa k nulovému bodu geodetického systému WGS 84 a s výškami v celých metroch.

Odhadovaná presnosť pred produkciou bola 20m pre výšky a 30m pre horizontálnu polohu, neskôr však výskum, ktorý porovnával získané dáta so SRTM DEM s presnosťou na 30m ukázal, že presnosť výškových hodnôt je v rozmedzí 100–120m [14].

Formát GeoTIFF GeoTIFF je jedným z množiny podporovaných formátov na čítanie a zapisovanie geografických dát. GeoTIFF je štandardným formátom obsahujúcim meta-dáta, ktorý do súboru TIFF umožňuje vloženie georeferenčných informácií. Tieto informácie zahŕňajú projekciu mapy, súradnicový systém a ďalšie potrebné údaje na určenie presnej geopriestorovej referencie súboru.



Obr. 4.2: Porovnanie rozlíšení ASTER GDEM (vľavo) a SRTM DEM (vpravo) vrchovatej časti v centrálnom Colorade. Zdroj: [14].

4.4 Typ aplikácie

Pri návrhu základného konceptu aplikácie som zvažoval dve možnosti. Jednou možnosťou bolo vytvorenie desktopovej aplikácie, ktorá beží lokálne na počítači či notebooku, narozdiel od druhej možnosti, realizovať modul ako webovú aplikáciu, ktorá beží na serveri a užívateľ k nej má prístup pomocou webového prehliadača. Hlavnou nevýhodou webových aplikácií, ktoré používajú internetové zdroje² je nutnosť pripojenia k internetu, čo v dnešnej dobe nepredstavuje problém.

Na základe toho, že schopnosti webových prehliadačov a ich podpora pre multimedialne funkcie umožňujú vyvíjať interaktívnejšie a prívetivejšie používateľské rozhrania, som sa rozhodol modul realizovať ako webovú aplikáciu.

Navrhnutý rozširujúci modul uvažuje beh serverovej časti na lokálnom počítači. Tým že server beží lokálne, modul má prístup k súborovému systému počítača a jednoduchým spôsobom umožňuje spustenie aplikácie AR Sandbox.

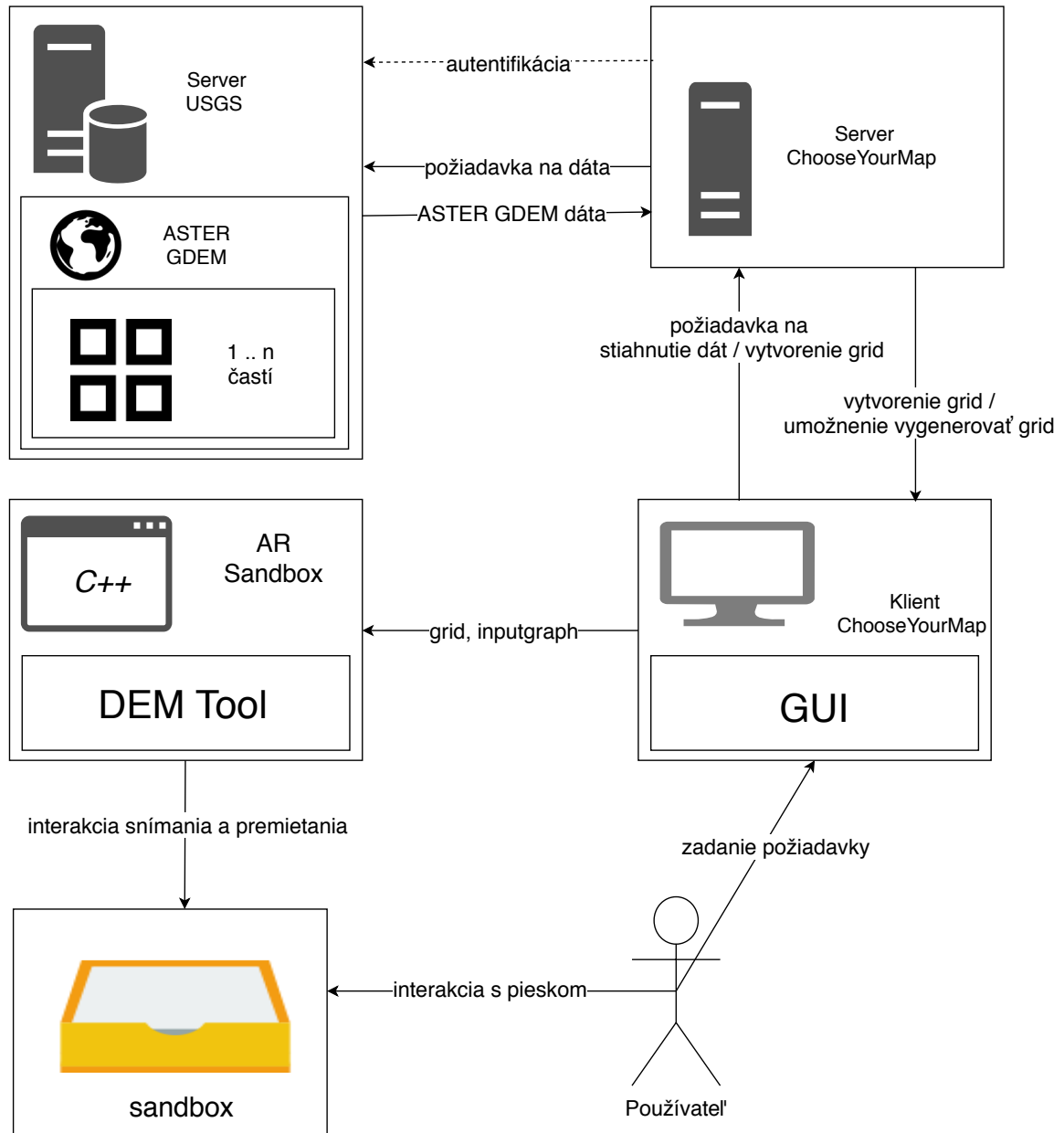
Realizácia modulu ako webovej aplikácie bola podmienená najmä možnosťou využitia rozhrania Google maps API, frameworkov, internetových technológií a knižníc, vďaka ktorým je aplikácia interaktívnejšia, prehľadnejšia a jednoduchšia na implementáciu.

²napr. Google maps

4.5 Schéma systému

Na základe výberu typu aplikácie a použitých dát reprezentuje rozširujúci modul webovú aplikáciu so serverovou a klientskou časťou, s grafickým užívateľským rozhraním.

Obrázok 4.3 znázorňuje jednotlivé komunikujúce časti systému. Každú akciu v systéme iniciuje používateľ pomocou GUI.



Obr. 4.3: Schéma prepojenia rozširujúceho modulu s aplikáciou AR Sandbox.

Jednou z užívateľských požiadaviek môže byť požiadavka na vygenerovanie výstupného grid súboru. Používateľ pomocou posuvného okna vyberie oblasť mapy, ktorú chce modelovať.

Ak serverová časť aplikácie disponuje dátami pre danú oblasť, užívateľ zvolí príslušné tlačidlo na vytvorenie grid súboru a následne sa spustí aplikácia AR Sandbox s daným súborom.

Ak pre danú oblasť dáta nie sú k dispozícii, užívateľ vytvorí požiadavku na stiahnutie geografických dát pre danú oblasť. Server sa autentifikuje pomocou prihlasovacieho mena a hesla, a odošle požiadavku na USGS server, na ktorom sú uložené požadované ASTER GDEM dáta a zaháji sa sťahovanie.

Používateľ následne musí počkať kým sa dané dáta stiahnu a informujú ho o úspešnom sťahovaní dialógovým oknom. Následne užívateľ môže uskutočniť výber mapy z požadovanej oblasti a pošle požiadavku na vytvorenie grid súboru. Používateľ okrem interakcie s grafickým užívateľským rozhraním interaguje s pieskom, ktorý je uložený v sandboxe a tvaruje piesok do príslušných tvarov odpovedajúcich zvolenej výškovej mape.

4.6 Analýza požiadaviek

Požiadavky aplikácie určujú, akú funkčnosť má aplikácia poskytovať a definujú, aký je jej účel. Požiadavky na funkčnosť sú nasledujúce:

1. Intuitívny výber oblasti pomocou posuvného okna.
2. Jednoduché spustenie aplikácie AR Sandbox s vybranou mapou.
3. Ukladanie vygenerovaných máp.
4. Načítavanie uložených máp.
5. Efektivita vytvorenia mapy.

4.7 Grafické používateľské rozhranie

Návrh grafického používateľského rozhrania zohráva dôležitú rolu, pretože pomocou neho užívateľ komunikuje s aplikáciou. Medzi hlavné požiadavky na grafické používateľské rozhranie patrí použiteľnosť, jednoduchosť a užívateľská prívetivosť.

4.7.1 Mockup - grafický návrh

Obrázok 4.4 znázorňuje mockup navrhnutého GUI. V hornej časti aplikácie nachádza uvítací informačný banner s názvom aplikácie a s užitočným odkazom na oficiálnu stránku AR Sandboxu. Pod ním v ľavej časti je umiestnené pole v tvare obdĺžnika reprezentujúce ovládací panel aplikácie.

Funkcie, ktoré ovládací panel ponúka sú znázornené tlačidlami s označeniami *Save/Load*, *Let's shape*, *Download data* a *Center window*. V jeho hornej časti sa nachádza vstupné pole, do ktorého užívateľ zadáva meno mapy pre jej uloženie alebo načítanie.

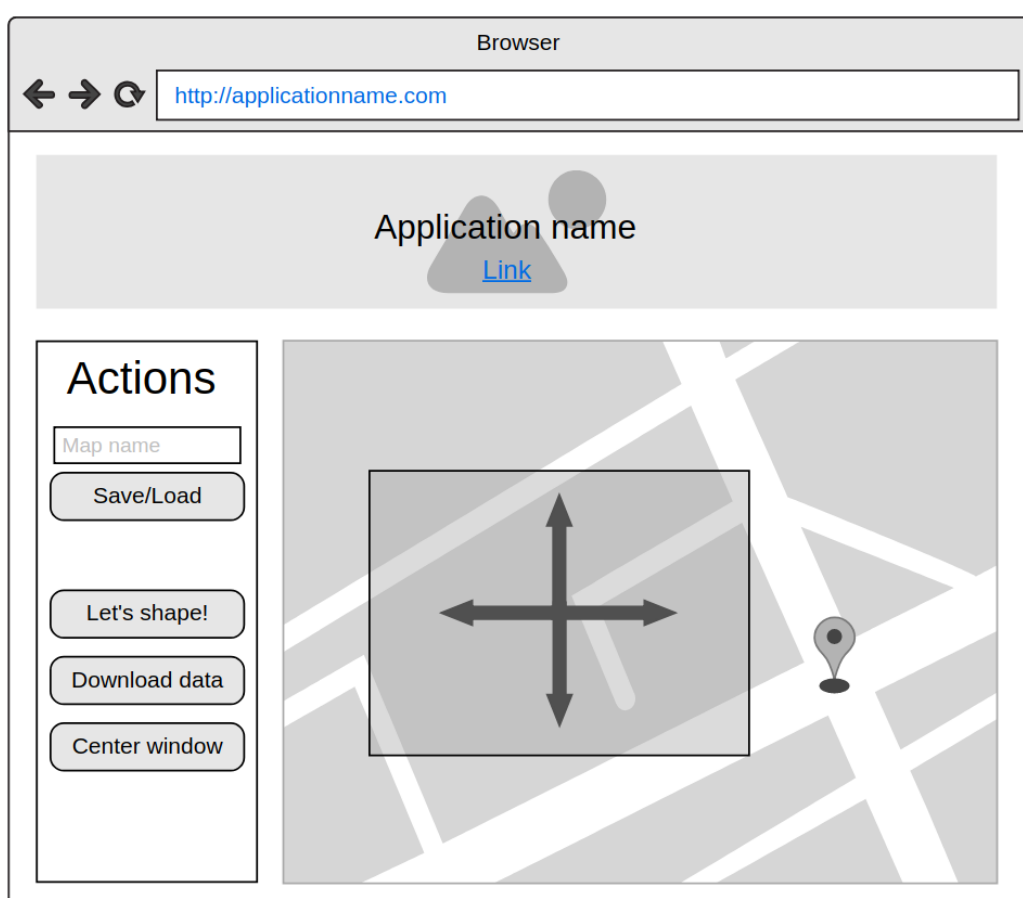
Napravo od ovládacieho panelu je umiestnené pole reprezentujúce topografickú mapu, z ktorej si užívateľ pomocou posuvného okna vyberie príslušnú časť mapy a použije relevantné tlačidlo z ovládacieho panelu s príslušnou funkciou:

- *Save/Load* – načítanie, uloženie mapy pod príslušným menom
- *Let's shape* – spustenie AR Sandbox s vybranou mapou (gridom)

- **Download data** – stiahnutie dát
- **Center window** – zarovnanie okna na stred

Posuvné okno je znázornené nad mapou so štvoritou šípkou smerujúcou do všetkých svetových strán, čo indikuje možnosť posunu a prispôsobenia veľkosti. Ofarbenie posuvného okna sa mení na základe pokrytia dostupnými súbormi na serveri, pričom platí:

- súbory sú dostupné – možné použiť tlačidlo **Let's shape** – okno je čierne
- súbory sú nedostupné – možné použiť tlačidlo **Download data** – okno je modré
- vybraná oblasť je príliš rozsiahla³ – nemožnosť použiť **Let's shape** ani **Download data** – okno je červené



Obr. 4.4: Mockup grafického používateľského rozhrania navrhnutej aplikácie. Obrázok bol vytvorený na webovej stránke *moqups.com*.

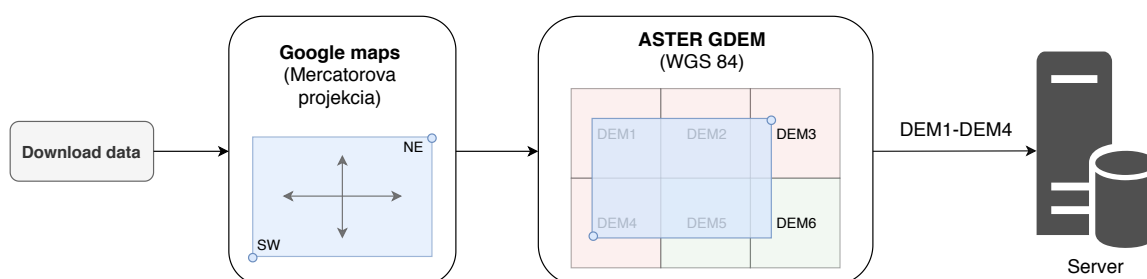
³obmedzenie výberovej oblasti (približne 220km na výšku okna) kvôli časovej náročnosti spracovania a sťahovania

4.8 Získavanie a uchovávanie dát

Vedecká agentúra USGS⁴ umožňuje prostredníctvom webovej aplikácie *EarthExplorer*⁵ prístup k rôznym typom geografických dát, ktoré sa líšia pokrytím oblastí a rozlíšením. Do množiny dát, ktoré poskytuje spadajú aj spomínané ASTER GDEM dáta, uložené v komprimovanom formáte zip.

Pre vytvorenie grid súboru z DEM modelu potrebujeme pracovať so súbormi lokálne. Súbor sú ukladané (pre budúce použitie) kvôli efektívnosti a rýchlosti vytvárania grid súborov.

Pre sťahovanie sa používa tlačidlo **Download data**. Užívateľ vyberie oblasť posuvným oknom, použije tlačidlo a následne prebieha sťahovanie automaticky bez interakcie užívateľa s aplikáciou EarthExplorer. Webové mapy využívajú pre zobrazovanie máp Mercatorovu projekciu. Celá svetová mapa (zemského povrchu) je zložená zo štvorcových DEM modelov. ASTER GDEM dáta sú definované súradnicami v systéme WGS 84. Zemepisné súradnice bodov NE (NorthEast), SW (SouthWest) výberového okna sa použijú pre určenie, ktoré dáta potrebujeme stiahnuť pre vytvorenie mapy danej výberovým oknom.



Obr. 4.5: Princíp určenia, ktoré súbory je potrebné stiahnuť. Sťahovanie prebieha automaticky.

Súbory je možné získať pomocou url adries, ktoré obsahujú podreťazec určujúci meno súboru. Mená súborov sú dané zemepisnou šírkou a dĺžkou oblasti, ktorú pokrýva príslušný DEM, a jej georeferenciou v závislosti na priesečníku rovníka a nultého poludníka (napr. DEM N49E016 pokrývajúci mestskú časť Brna). Existujú práve štyri oblasti do ktorých môže patriť príslušný GeoTIFF súbor: severovýchodná (NE), severozápadná (NW), juho-východná (SE) a juhozápadná oblasť (SW).

Hlavnou požiadavkou je zachovanie pomeru strán 4:3 vo WGS. Pri použití Mercatorovej projekcie je nutné prispôbovať zemepisnú šírku výberového okna, tak aby odpovedala pomeru strán 4:3 v systéme WGS. Tento pomer strán súvisí s požiadavkami formátu grid (pozri sekciu 2.5.1). Výberové okno sa preto môže v konečnom dôsledku javiť⁶, že pomer strán 4:3 nezachováva.

Na obrázku 4.5 vidíme použitie výberového okna zasahujúceho do šiestich DEM súborov. Jeho súradnice určujú, že práve tieto súbory sú potrebné na stiahnutie. Časti označené zelenou farbou (DEM 5 a 6) znamenajú, že dáta sú uložené na serveri a sú k dispozícii. Zvyšné 4 DEM súbory je nutné stiahnuť (ak chceme pre danú oblasť vytvoriť grid). Stiahnuté dáta v komprimovanom súbore sa následne spracujú a uložia.

⁴<https://www.usgs.gov/>

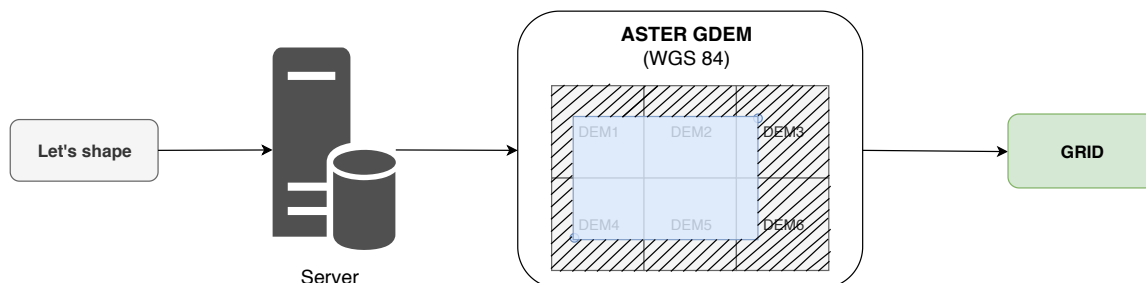
⁵<https://earthexplorer.usgs.gov/>

⁶spôsobené veľkým skreslením vo väčších zemepisných šírkach; v oblastiach pri rovníku je toto skreslenie redukované na minimum

4.9 Konverzia DEM do formátu grid

Pre vytvorenie súboru grid a následné spustenie aplikácie AR Sandbox sa používa tlačidlo *Let's shape*. Rovnako ako pri sťahovaní uvažujeme dve projekcie (systémy).

Stiahnuté súbory obsahujú spomínané metadáta (pozri 4.3.1), ktoré určujú ich georeferenciu v rámci WGS 84.



Obr. 4.6: Znáznornenie spojenia, orezania a konverzie DEM na grid.

Ná obrázku 4.6 môžeme vidieť, že na základe ich georeferencie sme schopní príslušné DEM 1 až 6 spojiť. Následne je potrebné orezanie podľa priestoru, ktorý vymedzuje výberové okno. Orezaním dosiahneme, že výstupný DEM súbor bude mať vo WGS zachovaný požadovaný pomer strán. V rámci orezu sa upravuje (znižuje) rozlíšenie orezaného súboru kvôli nasledujúcim dôvodom:

- obmedzené rozlíšenie hĺbkového senzoru Kinect
- príliš veľké detaily a rozlíšenie DEM pri klesajúcich mierkach⁷

Orezaný súbor môže obsahovať pixely, ktoré neobsahujú výškové dáta, z dôvodu, že ASTER nie je schopný zachytávať výškové dáta veľkých vodných plôch (morí, oceánov), a preto je nutné tieto pixely upraviť (na nulovú⁸ hodnotu).

Na začiatku procesu konverzie sa zistí rozlíšenie orezaného rastrového DEM súboru reprezentované počtom riadkov a stĺpcov. Počet stĺpcov a riadkov sa uloží na začiatok vytváraného súboru grid.

Pomocou vzorca Haversine (pozri 2.4.5) je potrebné prepočítať rozpätia výberového okna (vzdialenosť medzi bodmi NE–NW a NE–SE) zo stupňov zemepisnej šírky a dĺžky do jednotiek v metroch, kvôli požiadavkám formátu grid. Ide o priestorové rozsahy vybranej mapy (skutočné vzdialenosti v metroch). Vypočítané hodnoty sú uložené v nasledujúcom poradí za počet stĺpcov a riadkov: 0, 0, vzdialenosť NE–NW, vzdialenosť NE–SE.

Použitie Haversine môže spôsobiť pri výpočtoch vzdialeností mierne odchýlky⁹, ktoré sú v našom prípade zanedbateľné, pretože veľkosť vytvoreného gridu je obmedzená výberovým oknom.

Pri prudkých zmenách nadmorských výšok v DEM modeli je nutné dáta vyhladiť, aby bola mapa jednoduchšie modelovateľná. Vhodný spôsob pre vyhladenie dát predstavuje Gaussovský filter¹⁰, ktorý v DEM tieto zmeny redukuje. Po vyhladení výškových hodnôt uložíme výšky do výstupného grid súboru a tým je konverzia DEM do grid hotová.

⁷ malé mierky zobrazujú veľké oblasti mapy

⁸ úprava hodnôt NoData na 0 je v GIS systémoch bežnou praxou

⁹ počíta so Zemou ako s guľovou plochou; odchýlka narastá so vzdialenosťou

¹⁰ <https://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/gsmooth.htm>

4.10 Škálovanie a predanie grid do AR Sandbox

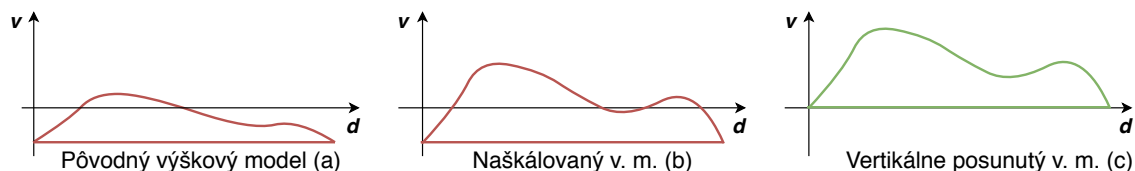
Výškové hodnoty je následne nutné upraviť do tvaru, ktorý umožňuje prívetivú modelovateľnosť pre užívateľa. Škálovaním (úpravou mierky) výškových hodnôt dosiahneme, že ak sa na modelovanej mape nachádzajú nejaké kopce tak ich užívateľ bude môcť modelovať (pri výbere rozsiahlejšej oblasti s malými nerovnosťami užívateľ bez použitia mierky takmer nič nemodeluje). Táto úprava mierky umožňuje modelovať aj malé kopce vo veľkých mierkach mapy (malé oblasti). Škálovanie zabezpečuje, že rovnako rozsiahla¹¹ rovinatá a vrchovatá oblasť bude modelovateľná.

Výpočet mierky závisí na rozdiel medzi najvyššou a najnižšou výškou DEM a vypočítanej vzdialenosti (vzorcom Haversine) medzi najvýchodnejším a najzápadnejším bodom DEM modelu.

Následne je potrebné určiť vertikálny posun výšok DEM modelu, tak aby na modelovanie mapy bol použitý všetok piesok. Vertikálny posun bol určený na základe experimentálneho testu (obrázok 4.8), pri ktorom boli všetky výškové hodnoty DEM modelu upravené na hodnotu 0 a povrch piesku bol zarovnaný rovnomerne. Upravovaním hodnoty posunu sme sa snažili dosiahnuť, aby systém dával spätnú väzbu o tom, že je model vytvorený správne (nikde netreba ubrať ani pridať piesok). Na obrázku 4.7 môžeme vidieť princíp, ako sa upravujú výškové hodnoty – škálovaním a vertikálnym posunutím.

Úprava výškových hodnôt sa prevádza v aplikácii AR Sandbox v rámci módu DEM Tool. Vypočítaná mierka, vertikálny posun a vytvorený súbor grid sú prostredníctvom inputgraphu (pozri 2.5.2) predané aplikácii AR Sandbox. Aplikácia pomocou afinných transformácií mapuje vytvorený grid súbor do priestoru sandboxu použitím vhodne vypočítanej mierky a vertikálneho posunu.

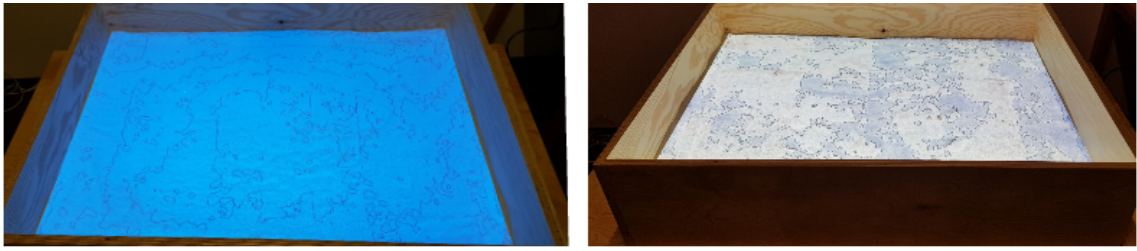
Pre každý vytvorený grid súbor je potrebné vytvárať odpovedajúci inputgraph. Ten sa vytvára (prípadne ukladá) spolu so súborom grid na serveri. Pre konkrétny grid, inputgraph v sekcii DEM Tool obsahuje mierku, posun a cestu k súboru. Obidva súbory (grid, inputgraph) sa použijú pri spustení aplikácie AR Sandbox.



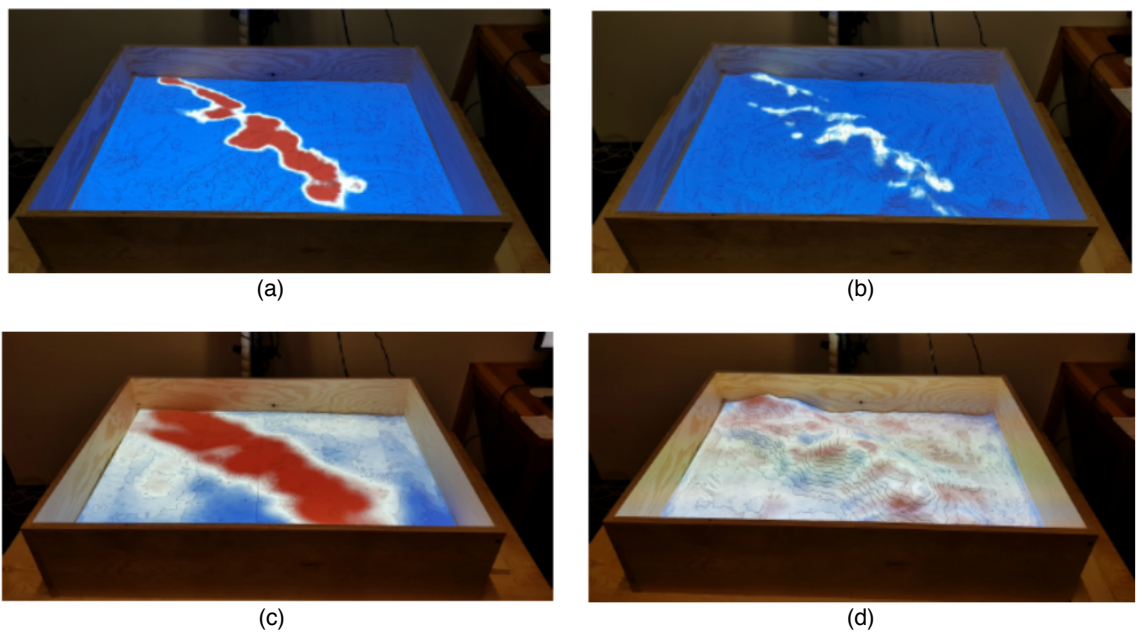
Obr. 4.7: Princíp úpravy mierky a vertikálneho posunu, kde v predstavuje výškové hodnoty a d priestorový rozsah (vzdialenosť medzi hraničnými bodmi DEM modelu). Na obrázkoch môžeme vidieť výškové hodnoty pozdĺž priestorového rozsahu znázornené ako výškové modely (pôvodný (a), upravený mierkou (b), upravený mierkou a vertikálnym posunom (c)).

Na obrázku 4.9 môžeme vidieť ukážku z experimentu, v ktorom systém navádza k vytvoreniu modelu tej istej oblasti bez posunu (a, b) a s posunom (c, d). Výšky boli škálované v oboch prípadoch.

¹¹vzhľadom na priestorové rozsahy orezaného DEM modelu v metroch



Obr. 4.8: Výšková mapa s nulovými hodnotami bez vertikálneho posunu (vľavo) a s určeným vertikálnym posunom (vpravo).



Obr. 4.9: Systém v modelovacom móde DEM Tool – vytváranie modelu Malých Karpát. Na obrázku (a) je znázornené navádzanie systémom k vymodelovaniu mapy (s použitím vypočítanej mierky). Obrázok (b) znázorňuje pokus o vymodelovanie (z modrých oblastí potrebujeme uberať piesok, ale už žiaden nie je k dispozícii – mapa nie je modelovateľná). Na obrázku (c) je výšková mapa upravená mierkou aj vertikálnym posunom. Obrázok (d) – pokus o vymodelovanie (mapa je modelovateľná).

Kapitola 5

Implementácia rozširujúceho modulu

V tejto kapitole je rozoberaná implementácia rozširujúceho modulu aplikácie AR Sandbox pre výber mapy. Na základe návrhu bola vytvorená webová aplikácia s klientskou a serverovou časťou. Na začiatku sú vymenované jednotlivé použité technológie pre obe uvažované časti a následne je stručne popísaná implementácia klientskej časti a jej GUI. V rámci popisu serverovej časti je opísaný proces sťahovania, konverzie DEM súborov a spôsob predania súboru grid aplikácii AR Sandbox. V poslednom rade je popísané ako sú uchovávané jednotlivé dáta.

5.1 Technológie

Výber technológií súvisí s funkčnými požiadavkami realizovaného systému. Aplikácia pozostáva zo serverovej a klientskej časti. Tým, že ide o webovú aplikáciu sú použité odpovedajúce technológie.

5.1.1 Backend

Na implementáciu serverovej časti aplikácie bol použitý framework **Django**¹, ktorý je založený na jazyku Python. Jeho cieľom je zjednodušiť vytváranie komplexných webových stránok, pričom kladie dôraz na opätovné použitie komponentov, používanie menšieho množstva kódu a rýchly vývoj webových stránok a webových aplikácií. Jeho použitie bolo podmienené možnosťou použitia internej databázy a možnosťou jednoducho reagovať na Ajax požiadavky (dynamická zmena obsahu). Pre implementáciu sme použili verziu *Django 2.1.7* a jazyk *Python 3.5.2*.

Pre prácu s geografickými dátami sú používané funkcie knižnice **GDAL**² (Geospatial Data Abstraction Library). Táto knižnica je zameraná na spracovanie a transformáciu rastrových a vektorových geopriestorových dát. Poskytuje možnosť transformácie a prispôbenia dát do požadovaného tvaru a formátu (napr. GeoTIFF).

¹<https://www.djangoproject.com/>

²<https://www.gdal.org/>

5.1.2 Frontend

V klientskej časti je využitý skriptovací jazyk **JavaScript** a knižnica **jQuery**³, ktorá uľahčuje manipuláciu s HTML prvkami, prácu s udalosťami, animáciami a požiadavkami **AJAX**. Pre určenie obsahu webovej aplikácie bol použitý značkový jazyk **HTML**. Pre štýly bol využitý CSS framework **Bootstrap**⁴. Aplikácia v klientskej časti využíva modul a funkcie Google maps prostredníctvom **Google Maps API**⁵.

Google maps API umožňuje integrovať mapu do webovej stránky, a prispôbiť či obohatiť ju o vlastný obsah. Google maps API obsahuje štyri základné typy máp, ktoré je možné upraviť a rozšíriť pomocou vrstiev, ovládacích prvkov a reakcií na udalosti. Použitie tohto API bolo podmienené spomenutými možnosťami, rozsiahlou dokumentáciou s príkladmi a kvôli všeobecnému povedomiu používateľov o používaní Google maps.

5.2 Uživatelské rozhranie

Vytvorená webová aplikácia sprostredkuje na základe požiadaviek 4.6 grafické používateľské rozhranie, ktoré reprezentuje obrázok 5.1.

Na obrázku môžeme vidieť vykonané zmeny v GUI v porovnaní s návrhom, konkrétne zmeny týkajúce sa umiestnenia a významu tlačidiel. Tlačidlo na ukladanie bolo nahradené tlačidlom vedľa vstupného poľa (zelený štvorček), ktoré umožňuje povoliť automatické ukladanie. Na obrázku môžeme vidieť zachovanie požadovaného pomeru strán výberového okna.

Implementáciu klientskej časti predstavujú funkcie v skriptoch `map.js` a `main.js`. Najzaujímavejšou funkciou zo skriptu `map.js` je funkcia `recBoundsChangedCallback()`, ktorá prispôbuje rozmery (na základe aktuálnych zemepisných šírok) a farbu výberového okna (na základe dostupnosti DEM súborov na serveri). Informácie (vo formáte JSON) o dostupných súboroch sa predávajú skrytým vstupným polom (z angl. *input*). Funkcie v skripte `main.js` zabezpečujú jednoduché ukladanie a načítavanie uložených máp (výberom či automatickým dopĺňaním mien), a vytváranie Ajax požiadaviek.

5.3 Sťahovanie dát

Samotné sťahovanie dát pozostáva z niekoľkých krokov: autentifikácia, kontrola dostupnosti súborov a sťahovanie. Sťahovanie súborov zabezpečujú funkcie implementované v skripte `usgs_download.py`. Súborov na USGS serveri sú uložené v komprimovanom súbore vo formáte *zip*, ktorý obsahuje okrem DEM modelu aj ďalšie súbory. Súborov sa sťahujú prostredníctvom odkazu presmerovaním na *url*.

Celý skript je postavený na knižnici `urllib`, ktorá umožňuje odosielať HTTP požiadavky metódami POST a GET, a získavať obsah webových stránok.

Zoznam potrebných súborov je získaný pomocou funkcie `get_necessary_tif_filenames(bounds)`, ktorá očakáva ako vstupný argument hranice výberového okna.

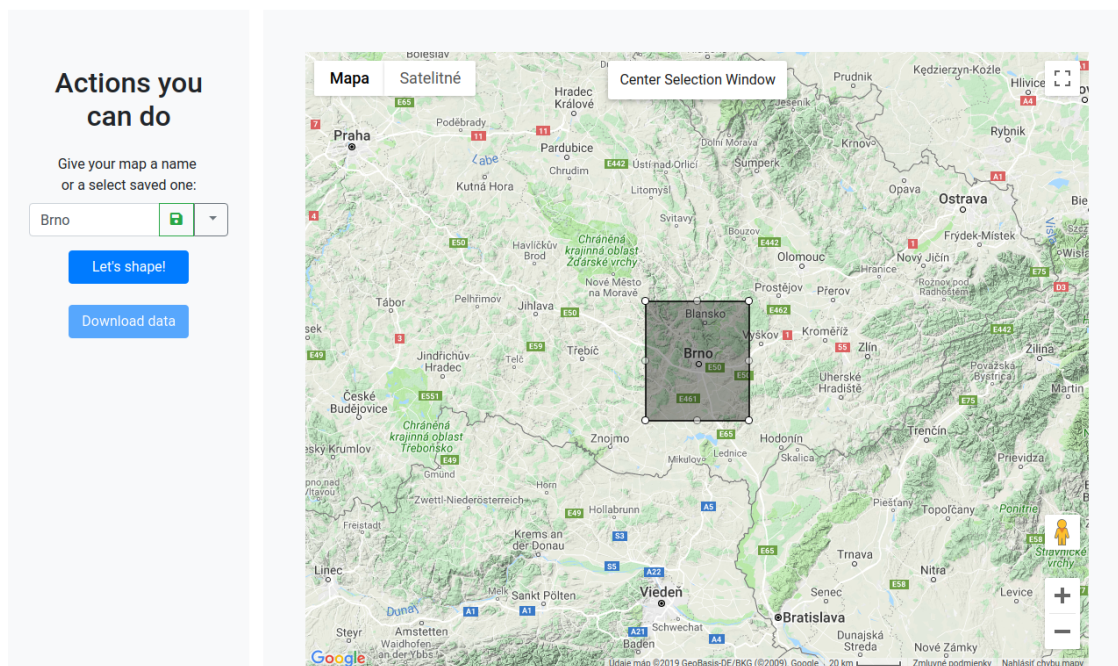
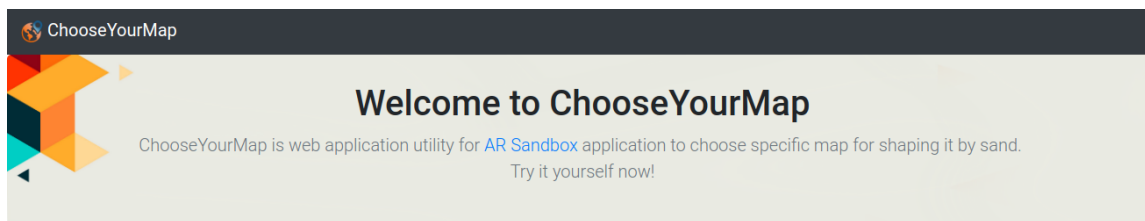
Samotnému sťahovaniu súborov predchádza autentifikácia užívateľským menom a heslom. USGS používa na overenie pri prihlasovaní CSRF token⁶. Problém s CSRF tokenom

³<https://jquery.com/>

⁴<https://getbootstrap.com/>

⁵<https://developers.google.com/maps/documentation/>

⁶náhodne vygenerovaný reťazec pri každom zobrazení formulára (zabezpečovací mechanizmus)



Obr. 5.1: Výsledné GUI webovej aplikácie.

sa rieši v rámci procesu autentifikácie vo funkcii `connect_to_usgs()`. Skript simuluje prihlasovanie užívateľa a následne je umožnené sťahovanie.

Najprv sa overuje dostupnosť dát na serveri USGS a upraví sa zoznam súborov pre stiahnutie (ak okno zasahuje do oblastí, pre ktoré dáta nie sú k dispozícii⁷).

Vytvorený zoznam súborov sa použije pre ich stiahnutie pomocou odpovedajúcich URL adries. Sťahovanie zabezpečuje funkcia `usgs_download_data()`.

5.4 Konverzia DEM

Ďalšou súčasťou implementácie je konverzia DEM modelu do formátu grid s ktorou pracuje aplikácia AR Sandbox prostredníctvom modulu DEM Tool. Konverziu dát zabezpečujú funkcie implementované v skripte `tif2grid.py`.

Samotná konverzia pozostáva zo: spojenia súborov, orezania, vyhladenia výšok a vytvorenia súboru grid. Na spojenie súborov bola použitá funkcia `gdal_merge` z knižnice GDAL (spojenie na základe georeferencie). Vstupom je zoznam súborov a výstupom je jeden súbor, ktorý reprezentuje spojenú oblasť.

Pre orezanie hranicami výberového okna bola použitá funkcia `gdal_translate`. V rámci orezu sa znížilo rozlíšenie DEM súboru (prepínačom `-outsize`) a zároveň, boli nastavené

⁷napr. veľké vodné plochy (moria, oceány)

výškové hodnoty pixelov, ktoré neobsahujú výškové dáta (prepínač `-a_nodata`). Výškové hodnoty sú následne vyhladené funkciou `gaussian_filter` z balíčka NumPy.

Pre vytvorenie grid súboru potrebujeme zistiť rozlíšenie orezaného DEM súboru a vypočítať jeho priestorové rozsahy. Pre zistenie rozlíšenia je použitá funkcia `get_pixel_resolution`, ktorá vracia rozlíšenie DEM súboru ako počet stĺpcov a riadkov. Priestorové rozsahy sú vypočítané funkciou `dist_haversine` na základe súradníc rohových bodov výberového okna (Haversine vzorec pre výpočet vzdialenosti 2.4.5). Následné sú tieto údaje uložené do súboru ako binárne dáta vo formáte grid.

5.5 Predanie súboru grid aplikácii AR Sandbox

Po vypočítaní rozsahov môžeme vypočítať mierku, ktorej hodnota sa použije pri predaní súboru grid aplikácii AR Sandbox. Pre výpočet mierky je použitá funkcia `get_scale_factor`. Na základe experimentu popísaného v návrhu poznáme hodnotu vertikálneho posunu.

Pre predanie súboru grid aplikácii AR Sandbox potrebujeme vytvoriť odpovedajúci inputgraph. Pre vytvorenie inputgraphu použijeme funkciu `create_inputgraph`, ktorá využíva vzorový súbor (template) pre vytvorenie nového inputgraphu s hodnotou vypočítanej mierky, vertikálnym posunom a cestou k súboru grid.

Následne je možné spustiť aplikáciu AR Sandbox s príslušným inputgraphom. Pre spustenie je použitá funkcia `run_sandbox`, ktorá spúšťa aplikáciu so vstupnými argumentmi. Jedným z nich je argument `-loadInputGraph` pomocou, ktorého sa aplikácii predá súbor grid spolu s mierkou a posunom.

5.6 Uchovávanie dát

Vytvorená aplikácia využíva 3 rôzne spôsoby ukladania dát pre splnenie rôznych funkčných požiadaviek. Sťahované súbory, reprezentujúce DEM modely sú v systéme ukladané lokálne. Na základe ich názvov sme schopní určiť akú oblasť pokrývajú, preto nie je potrebné ich uloženie do databázy.

Informácie o poslednej polohe a veľkosti výberového okna, a súvisiaceho priblíženia mapy sú uložené v prehliadači pomocou cookies. To zabezpečuje, že pri opätovnom načítaní stránky sa umiestnenie výberového okna nezmení.

Ukladanie vytvorených grid súborov vyžaduje spolu s uloženým súborom zaznamenanie ďalších dodatočných informácií pre ich spätné načítanie. Z toho dôvodu bola pre ich uloženie použitá databáza *SQLite*⁸. Tabuľka 5.1 s jednotlivými položkami a ich popisom reprezentuje uloženú mapu (grid) v databáze.

SavedMap		
id	int	Primárny kľúč.
gridname	varchar(50)	Názov uloženého grid súboru.
bounds	varchar(100)	Zemepisné súradnice hraníc výberového okna.
zoom	int	Priblíženie, pri ktorom bol súbor grid vytvorený.
gridfile	varchar(100)	Cesta k súboru grid.
inputgraph	varchar(100)	Cesta k súboru inputgraph.

Tabuľka 5.1: Uložená mapa (grid) v databáze.

⁸štandardná relačná databáza pre Django, ktorá je súčasťou distribúcie Pythonu

Kapitola 6

Testovanie a výsledky

Dôležitou súčasťou tvorby softvéru je jeho testovanie a získanie spätnej väzby od používateľov. Táto kapitola sa venuje návrhu, postupu a vyhodnoteniu testovania vytvorenej webovej aplikácie prepojenej s aplikáciou AR Sandbox

6.1 UEQ

UEQ (User Experience Questionnaire) predstavuje rýchly a spoľahlivý dotazník na meranie užívateľských skúseností s interaktívnymi produktmi, ktorý je k dispozícii vo viac ako 20 jazykoch. Sprostredkuje jednoduché použitie a vyhodnotenie vďaka bohatému doplnkovému materiálu [5].

Na testovanie užívateľských skúseností so systémom môže byť použitá krátka alebo dlhá verzia dotazníka UEQ, dostupná aj v českom jazyku. Týmto dotazníkom získame spätnú väzbu od užívateľov a zhodnotenie celkového dojmu z ich skúseností. Merajú sa ním klasické aspekty použiteľnosti (pragmatická kvalita – efektívnosť, prehľadnosť a spoľahlivosť), ale aj aspekty užívateľských skúseností (hédonická kvalita – originalita, stimulácia).

Na obrázku 6.1 môžeme vidieť jednotlivé položky krátkej verzie UEQ. Účastníci testovania hodnotia každú položku na 7-bodovej Likertovej stupnici, čo je metóda používaná na určenie miery stupňa súhlasu či nesúhlasu s nejakým tvrdením (7 bodov predstavuje interval $< -3, 3 >$).

bránící	o o o o o o o	podporující
složitý	o o o o o o o	jednoduchý
neefektivní	o o o o o o o	efektivní
matoucí	o o o o o o o	jasný
nudný	o o o o o o o	vzrušující
nezajímavý	o o o o o o o	zajímavý
obvyklý	o o o o o o o	vynalézavý
tradiční	o o o o o o o	moderní

Obr. 6.1: Krátka verzia UEQ dotazníka v českom jazyku s jednotlivými položkami. Zdroj: [5].

6.2 Návrh testovania

Na začiatku návrhu boli definované nasledujúce body, ktoré tvoria základ hodnotiaceho systému:

- Určenie cieľov testovania.
- Určenie hodnotiacej techniky.
- Určenie otázok a praktických úloh.
- Interpretácia a prezentácia výsledkov.

Hlavným cieľom testovania je získanie spätnej väzby od používateľov, týkajúcej sa ich skúseností pri používaní aplikácie a procesu modelovania mapy. Užívateľ hodnotí vytvorený rozširujúci modul v spojení s aplikáciou AR Sandbox. Ďalším cieľom je získanie užívateľských nápadov a návrhov na budúce vylepšenia a možnosti využitia systému s rozšírením.

Na testovanie sme sa rozhodli použiť testovací protokol, ktorý pozostáva z dotazníka UEQ, série konkrétnych otázok (úloh) a z nasledujúcich testovacích prípadov:

- úvodný ukázkový prípad (hra so "sandboxom"),
- testovací prípad č.1 (modelovanie pohoria z dostupných dát),
- testovací prípad č.2 (modelovanie oblasti s povodím rieky (jazerom) zo stiahnutých dát).

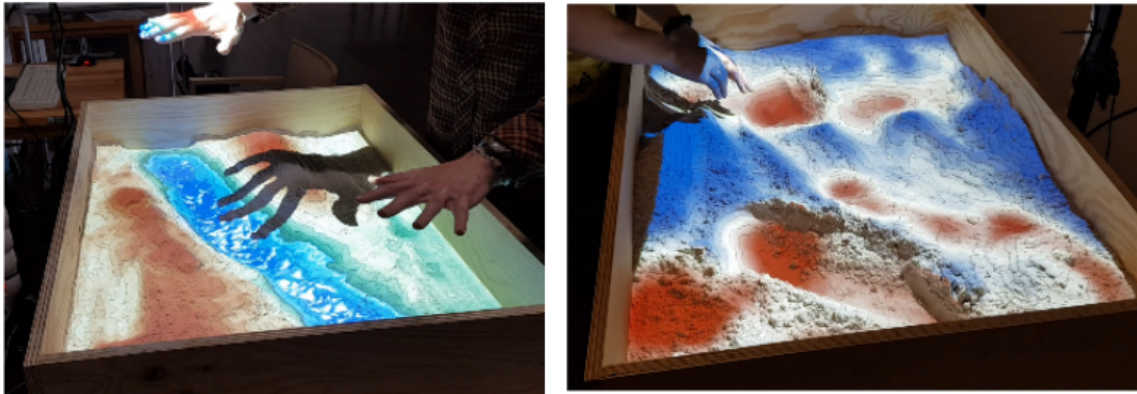
Na získanie podrobnejšej a subjektívnejšej spätnej väzby a názorov užívateľov o používanom systéme je použitá séria otázok:

- Aké možnosti využitia tohto systému vidíte vo vzdelávaní? Vymenujte a popíšte.
- Zhodnoťte proces modelovania vami vybraného pohoria (údolia, kopca, ...). Popíšte pozitívna a negatíva.
- Do voľného poľa doplňte vlastné hodnotenie a námety na vylepšenie.

Postup pri testovaní je jednoduchý. Užívateľ sa v prvom rade zoznámí so systémom a podrobí sa sérii testovacích prípadov. Následne vyplní dotazník UEQ a zodpovie otázky či dodá subjektívne nápady, návrhy na vylepšenie a diskutuje možnosti využitia. Dotazník a otázky sú užívateľovi poskytnuté v papierovej forme. Pred samotným testovaním je užívateľovi predaný informovaný súhlas, ktorého vyplnením užívateľ vyjadruje svoj súhlas s tým, že videozáznam z testovania môže byť použitý vo videu prezentujúce prácu. Na obrázku 6.2 môžeme vidieť fotografie z procesu užívateľského testovania.

6.2.1 Úvodný ukázkový prípad

Ukázkový prípad umožňuje užívateľovi zoznámenie sa so systémom AR Sandbox. Užívateľovi sú sprostredkované základné informácie o fungovaní aplikácie. Ako prvé si užívateľ vyskúša funkcie ako vykresľovanie topografickej mapy na povrch piesku a simuláciu vody (prvý mód). Po zoznámení sa s funkciami prvého módu je užívateľovi vybraná konkrétna mapa zvolená pre účel testovania druhého módu (DEM Tool), ktorú sa užívateľ pokúsi vy-modelovať. Ešte pred samotným prechodom ku konkrétnym testovacím prípadom je užívateľ v krátkosti oboznámený s rozširujúcim modulom a jeho funkciami. Po vykonaní testovania oboch módov užívateľom sa prejde k testovacím prípadom č.1 a č.2.



Obr. 6.2: Testovanie oboch módov aplikácie AR Sandbox s užívateľmi. Naľavo je základný mód a napravo mód DEM Tool.

6.2.2 Testovací prípad č.1

Užívateľ si podľa vlastného výberu zvolí oblasť na mape (napr. pohorie) a pokúsi sa vytvoriť jej model pomocou piesku. Na obrázku 6.3 môžeme vidieť užívateľa pri výbere mapy pomocou webovej aplikácie. Pri výbere užívateľ vyskúša nasledujúce funkcie GUI:

- posun výberového okna,
- približovanie a oddaľovanie okna,
- umiestnenie okna do stredu mapy,
- posun okna do oblasti, pre ktorú nie sú dáta k dispozícii.
- spustenie AR Sandbox s vybranou mapou,



Obr. 6.3: Výber mapy užívateľom pomocou vytvorenej webovej aplikácie.

6.2.3 Testovací případ č.2

V rámci druhého testovacího případu uživatel zadá požiadavku na stiahnutie dát pre oblasť, pre ktorú nie sú dáta k dispozícii. Po ukončení sťahovania si užívateľ zo stiahnutej oblasti vyberie oblasť s povodím určitej rieky (jazera), pre ktorú bude vytvárať model. Po vymodelovaní povodia rieky (jazera) sa do vytvoreného modelu napustí voda.

6.3 Vyhodnotenie testovania

Samotné testovanie bolo uskutočnené s 5 užívateľmi vo veku od 21 do 24 rokov (jeden vysokoškolsky vzdelaný, ostatní – stredoškolské vzdelanie s maturitou). Testovaní užívatelia sa v prvom rade zoznámili s aplikáciou AR Sandbox a s módom DEM Tool. Následne sa zúčastnili dvoch testovacích prípadov, po vykonaní ktorých mohli vyplniť dotazník UEQ a odpovedať na pripravené otázky.

6.3.1 Skúsenosti užívateľov a námety na zlepšenie

Nasledujúce odstavce predstavujú odpovede na otázky uvedené v sekcii 6.2. Respondenti popisujú možnosti využitia, proces modelovania a prinášajú námety na vylepšenie a úpravu systému.

Možnosti využitia Užívatelia vidia využitie aplikácie hlavne vo vzdelávaní v školských inštitúciách (základné a stredné školy). Hodiny geografie s vysvetľovaním mierky mapy, ako vznikli pohoria, ako sa zlieva voda (sneh) z pohorí do údolí, ako vzniká lavína, povodne a záplavy v konkrétnych oblastiach sveta. Ďalšie možnosti, ktoré popisujú sú: modelovanie vojnových situácií a taktík na základe výberu konkrétnej oblasti mapy, či využitie v zábavnom geografickom centre.

Proces modelovania Celkový proces výberu mapy a vytvárania jej modelu sa užívateľom zdal ako primerane náročný (skôr jednoduchý), čo odzrkadľuje aj druhý riadok tabuľky 6.1. S výsledkom (vymodelovanou mapou) boli všetci užívatelia spokojní. Po výbere mapy a spustení aplikácie AR Sandbox, musí užívateľ pre spustenie módu DEM Tool použiť relevantné tlačidlo na klávesnici. Užívateľom chýbala nápoveda, aké tlačidlo použiť. Ďalšou vecou, ktorú vytkli, bola zmena farby výberového okna bez informácie (napr. na červenú). Užívatelia chápu význam modulu pre výber mapy a zdá sa im nápomocný na vytváranie modelov, ktoré približne odpovedajú realite. Užívatelia hodnotia výber oblasti s jazerom či riekou pozitívne, tým, že si do danej oblasti môžu nasimulovať vodu.

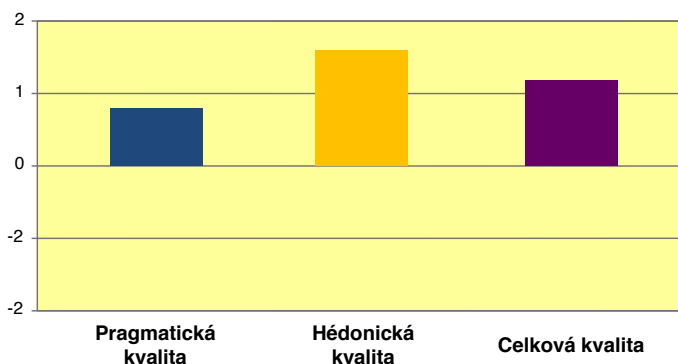
Návrhy a námety na vylepšenie Užívatelia navrhujú pridať návod na spustenie DEM Toolu. Užívateľovi č.1 pripadali tlačidlá *Download data* a *Let's shape* ako mätúce, pričom navrhol, ich spojenie do jedného tlačidla. Ďalším z užívateľských návrhov je pridanie možnosti na výber obtiažnosti modelovania napr. z dôvodu obmedzeného času na hodine geografie (možné vyriešiť znížením rozlíšenia a väčším vyhladením dát). Jeden z užívateľov by pri sťahovaní pridal informácie o tom, ako dlho sa budú dané dáta sťahovať.

6.3.2 Výsledky UEQ a ich interpretácia

Nasledujúca tabuľka 6.1 predstavuje vyhodnotenie posudzovaných aspektov pragmatickej a hédonickej kvality testovanej aplikácie. Stredné hodnoty sú vypočítané z hodnôt získanej dátovej vzorky pre každý hodnotený aspekt na škále -3 (negatívne) až 3 (pozitívne). Na obrázku 6.4 môžeme vidieť výsledné porovnanie dvoch uvažovaných kvalít s celkovou kvalitou aplikácie.

#	Stredná hodnota	Negatívne	Pozitívne
1	⇒ 0.6	bránicí	podporujúci
2	↑ 1.0	složitý	jednoduchý
3	⇒ 0.6	neefektívni	efektívni
4	↑ 1.2	matoucí	jasný
5	↑ 1.6	nudný	vzrušujúci
6	↑ 1.8	nezajímavý	zajímavý
7	↑ 1.2	obvyklý	vynalézavý
8	↑ 1.8	tradiční	moderní

Tabuľka 6.1: Interpretácia dát pomocou nástroja *UEQ-DataAnalysisTool*. Farebné odlíšenie modrou a oranžovou farbou znázorňuje pragmatické a hédonické aspekty kvality. Položky v druhom stĺpci predstavujú stredné hodnoty hodnotených aspektov. Farebnými šípkami je vyznačená kvalita daného výsledku, ktorá je v UEQ považovaná za neutrálnu pre interval $[-0.8, 0.8]$ (oranžová šípka), pozitívnu >0.8 (zelená šípka) a negatívnu <-0.8 .



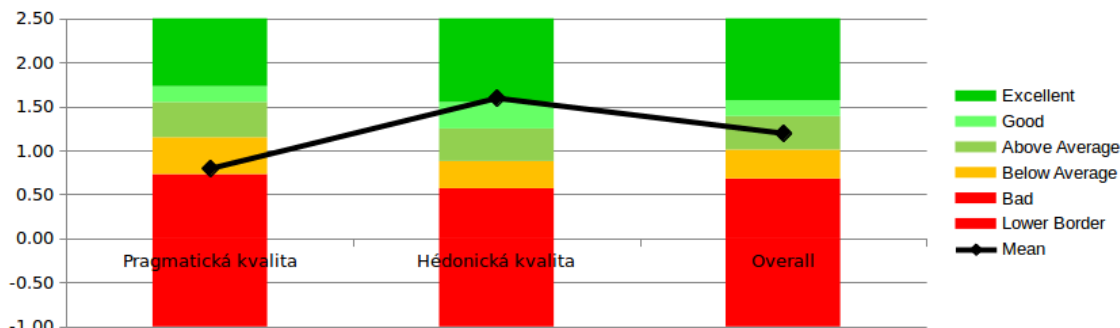
Obr. 6.4: Grafické znázornenie porovnania pragmatickej (0.8) a hédonickej (1.6) kvality s celkovou kvalitou aplikácie (1.2).

Na obrázku 6.5 môžeme vidieť výsledné porovnanie aplikácie s inými produktmi. Konkrétne ide o porovnanie so súborom dát (*benchmarkom*) obsahujúcim hodnotenia aplikácií, na hodnotenie ktorých bol taktiež použitý UEQ dotazník. Hodnotenú aplikáciu predstavujú rôzne softvérové riešenia, webové stránky, e-shopy, sociálne siete a pod. Z toho dôvodu musíme pri interpretácii výsledkov na to brať ohľad. Porovnanie výsledkov umožňuje urobiť závery o relatívnej kvalite hodnotenej aplikácie v porovnaní s inými produktmi:

Pragmatická kvalita aplikácie s hodnotou 0.8 je v porovnaní s benchmarkom pod priemerom (**below average**). Interpretujeme, že 50 % produktov je lepších a 25 % horších.

Hédonická kvalita aplikácie s hodnotou 1.6 je v porovnaní s benchmarkom o jednu úroveň nadpriemerom (**good**). Interpretujeme, že 10 % produktov je lepších a 75 % horších.

Celková kvalita so strednou hodnotou **1.2** je v porovnaní s benchmarkom v úrovni nad priemerom (**above average**). Výslednú kvalitu aplikácie interpretujeme tak, že 25 % produktov je lepších a 50 % horších. Celkové hodnotenie aplikácie v porovnaní s referenčnou dátovou sadou je mierne nadpriemerné.



Obr. 6.5: Porovnanie aplikácie s referenčným súborom dát (benchmark).

Na základe vyhodnotenia UEQ a testovania môžeme prehlásiť, že aplikácia sa užívateľom zdá byť zaujímavá a vynaliezavá. Pozitívne hodnotili najmä hédonické aspekty – zaujímavosť, moderný prístup a originalitu riešenia. Pragmatická kvalita je nižšia z dôvodu, že užívateľom nebolo úplne jasné ako systém s rozšírením používať a v priebehu testovania potrebovali krátku inštrukciú. Podpriemerne ohodnotili efektívnosť a to, akým spôsobom je riešenie podporujúce.

Užívateľské skúsenosti so systémom (s rozšírením) boli pozitívne a dokázali, že výsledný systém je použiteľný. Vyššia hodnota hédonickej kvality UEQ určuje, že podľa testovaných subjektov má systém hlavne zábavnú funkciu, ale na základe ich spätnej väzby sme zistili, že vidia potenciál aj vo vzdelávaní – možné využitie v zábavno-vzdelávacích strediskách.

Výberom a použitím vhodnej pedagogickej metodológie by bolo možné výsledný interaktívny systém zakomponovať do vyučovacieho procesu a zvýšiť tým záujem študentov o oblasti, ktorých pochopenie aplikácia AR Sandbox uľahčuje (topografia, hydrológia). Potenciálni používatelia či študenti si pomocou AR Sandboxu s rozšírením môžu napr. na hodinách geografie zvoliť a vymodelovať skutočné pohorie, povodie rieky alebo jazero, pozorovať ich náležitosti a diskutovať prípadné riziká (prietrž mračien, záplavy a povodne).

Zistili sme, že použitie rozširujúceho modulu vyžaduje isté technické znalosti (nízka pragmatická kvalita). Na základe toho by bolo možné používateľov systému rozdeliť do dvoch skupín (hlavne ak ide o mladších žiakov): študenti a pedagógovia (operátori). Operátor by mal na starosti správu sťahovania dát a výber mapy. Študenti by následne mohli spolupracovať pri vytváraní jej modelu. To predstavuje spôsob pre rozvíjanie mäkkých zručností (*soft skills*) a tímovej spolupráce.

Ďalším vskutným zaujímavým využitím rozšíreného modulu v systéme by mohli predstavovať takzvané "challenges", kedy si používatelia budú navzájom dávať výzvy a súperiť pri modelovaní.

Kapitola 7

Záver

Hlavným zámerom tejto práce bolo vytvorenie 3D interaktívnej výukovej aplikácie, ktorá pre interakciu s užívateľom využíva hĺbkový senzor. V rámci tejto práce sme vychádzali z existujúceho riešenia, ktorým je aplikácia AR Sandbox. Tá pomocou hĺbkového senzora Kinect a projektora vykresľuje interaktívnu topografickú mapu na povrch piesku. Použitiu tejto aplikácie predchádzala fyzická realizácia systému, v ktorom mohla byť využitá. Vytýčenými cieľmi boli hlavne vytvorenie interaktívneho užívateľského rozhrania pre vytváranie modelov máp, inovatívnym spôsobom užívateľovi sprístupniť výuku v oblasti topografie a možnosti využitia vytvoreného systému pre reprezentatívne účely a popularizáciu vedy na fakulte.

Podstatným úspechom je rozšírenie aplikácie o vytvorený modul – webovú aplikáciu, pomocou ktorej je užívateľovi sprístupnený modelovací mód. Vlastný výber mapy a jej následné modelovanie poskytuje využitie plného potenciálu pôvodnej aplikácie. Pomocou vytvoreného modulu si užívateľ môže zvoliť vlastný výrez mapy pre modelovanie, pričom modul získava a spracúva digitálne výškové modely pre účely vytvorenia súboru použiteľného v aplikácii AR Sandbox.

Výsledkom práce je funkčný interaktívny výukový systém, ktorý navyše sprostredkuje užívateľovi výber mapy. Vytvorený systém je použiteľný a ďalej rozširiteľný. Použitelnosť vytvoreného modulu v spojení s aplikáciou AR Sandbox bola overená užívateľskými testami, ktoré boli zamerané na získanie spätnej väzby týkajúcej sa klasických aspektov použiteľnosti a subjektívnych užívateľských skúseností (UEQ). Porovnaním riešenia s referenčnou dátovou sadou hodnotení iných aplikácií sa zistilo, že celkovou kvalitou patrí riešenie do lepších 50 %.

Možnosťou rozšírenia systému by mohlo byť to, že by sa aplikácia s vybranou mapou nemusela spúšťať pri každom výbere mapy, ale mapy by sa do aplikácie nahrávali počas behu. Druhý mód aplikácie AR Sandbox navádza užívateľa k modelovaniu mapy farebným odlíšením pomocou červenej (pridať) a modrej farby (ubrať), pričom ak je mapa v danej oblasti vymodelovaná správne tak je oblasť vyznačená bielou farbou. Možnosťou na vylepšenie tohto módu by mohlo byť mapovanie reálnych geografických snímok zemského povrchu na povrch piesku. Následne, ak by bola vymodelovaná oblasť správne, nebola by vyznačená bielou farbou, ale skutočnou scenériou (pôda, lesy, skaly).

Literatúra

- [1] Abhijit, J.: *Kinect for Windows SDK Programming Guide*. Community Experience Distilled, Packt Publishing, 2012, ISBN 978-1849692380.
- [2] Bradski, G.; Kaehler, A.: *Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library*. O'Reilly Media, 2008, ISBN 0596516134.
- [3] Dostál, J.: Interaktivní tabule – významný přínos pro vzdělávání. 2009, [Online; navštívené 21.2.2019].
URL http://www.nazornost-ucebni-pomucky.xf.cz/interaktivni_tabule.pdf?
- [4] Freedman, B.; Shpunt, A.; Machline, M.; aj.: Depth mapping using projected patterns. May 2010, Prime Sense Ltd., United States.
- [5] Hinderks, A.; Schrepp, M.; Thomaschewski, J.: User Experience Questionnaire. [Online; navštívené 28.4.2019].
URL <https://www.ueq-online.org/>
- [6] Izadi, S.; Kim, D.; Hilliges, O.; aj.: KinectFusion: real-time 3D reconstruction and interaction using a moving depth camera. In *Proceedings of the 24th annual ACM symposium on User interface software and technology*, ACM, 2011, s. 559–568.
- [7] Jenny, B.: Adaptive Composite Map Projections. *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*, ročník 18, 12 2012: s. 2575–2582, doi:10.1109/TVCG.2012.192.
- [8] Kettle, S.: Distance on a sphere: The Haversine Formula. [Online; navštívené 7.4.2019].
URL <https://community.esri.com/groups/coordinate-reference-systems/blog/2017/10/05/haversine-formula>
- [9] Khoshelham, K.: Accuracy analysis of Kinect depth data. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, ročník XXXVIII-5/W12, 05 2012.
- [10] Kreylos, O.: Augmented Reality Sandbox - About. [Online; navštívené 15.2.2019].
URL <https://arsandbox.ucdavis.edu/about/>
- [11] Kreylos, O.: Augmented Reality Sandbox - DEM Help. [Online; navštívené 5.3.2019].
URL <https://arsandbox.ucdavis.edu/forums/topic/dem-help/>
- [12] Kreylos, O.: Augmented Reality Sandbox - Hardware Requirements. [Online; navštívené 10.3.2019].
URL <https://arsandbox.ucdavis.edu/instructions/hardware-2/>

- [13] Kreylos, O.: Augmented Reality Sandbox - Software Installation. [Online; navštívené 20.2.2019].
URL <http://idav.ucdavis.edu/~okreylos/ResDev/SARndbox/LinkSoftwareInstallation.html>
- [14] MicroImages, Inc.: ASTER Global Elevation Data. July 2009, [Online; navštívené 1.4.2019].
URL <https://www.microimages.com/documentation/TechGuides/75asterDEM.pdf>
- [15] National Geospatial-Intelligence Agency: Office of Geomatics: World Geodetic System 1984 (WGS 84). [Online; navštívené 10.4.2019].
URL <http://earth-info.nga.mil/GandG/update/index.php?dir=wgs84&action=wgs84>
- [16] Ordnance Survey: A Guide to Coordinate Systems in Great Britain: An introduction to mapping coordinate systems and the use of GNSS datasets with Ordnance Survey mapping. 2008.
URL <https://www.ordnancesurvey.co.uk/docs/support/guide-coordinate-systems-great-britain.pdf>
- [17] Piaček, J.; Kravčík, M.: Topografia. online, 1999, [Online; navštívené 14.3.2019].
URL <http://dai.fmph.uniba.sk/~filit/fvt/topografia.html>
- [18] Rosenberg, M.: What Is the Distance Between Degrees of Latitude and Longitude? [Online; navštívené 16.4.2019].
URL <https://www.thoughtco.com/degree-of-latitude-and-longitude-distance-4070616>
- [19] Shary, P. A.: *Models of Topography*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008, ISBN 978-3-540-77800-4, s. 29–57, doi:10.1007/978-3-540-77800-4_3.
URL https://doi.org/10.1007/978-3-540-77800-4_3
- [20] Strebe, D.: Why Mercator for the Web? Isn't the Mercator bad? [Online; navštívené 19.3.2019].
URL <https://www.mapthematics.com/forums/viewtopic.php?f=8&t=251&p=344#p3>
- [21] Upadhyay, A.: Haversine Formula – Calculate geographic distance on earth. [Online; navštívené 7.4.2019].
URL <https://www.igismap.com/haversine-formula-calculate-geographic-distance-earth/>
- [22] Wilson, J. P.; Gallant, J. C.: *Terrain analysis : principles and applications*. New York: Wiley, Jan 2000, ISBN 0471321885.
- [23] Čuriová, H.: Prínos a využitie interaktívnej tabule v modernom vzdelávaní. [Online; navštívené 27.2.2019].
URL <https://www.pulib.sk/web/kniznica/elpub/dokument/Uherova4/subor/Curiova.pdf?>

Príloha A

Obsah CD

- **/xzubri00.pdf** – súbor obsahujúci text bakalárskej práce
- **/tex/** – adresár obsahujúci zdrojový kód pre vytvorenie textu práce
- **/sources/** – adresár obsahujúci zdrojové kódy aplikácie AR Sandbox a vytvorenej webovej aplikácie
- **/video.mp4** – video prezentujúce túto prácu
- **/README** – súbor obsahujúci podrobnejšie informácie o obsahu CD