Dominik Mazur, Otomar Gottstein

ALGORITMY POČÍTAČOVÉ KARTOGRAFIE

Úloha č. 3: Digitální model terénu

Zadání

Vstup: množina P = {p_1,..., p_n}, p_i = {x_i, y_i, z_i}.

Výstup: polyedrický DMT nad množinou P představovaný vrstevnicemi doplněný vizualizací sklonu trojúhelníků a jejich expozicí.

Metodou inkrementální konstrukce vytvořte nad množinou P vstupních bodů 2D Delaunay triangulaci. Jako vstupní data použijte existující geodetická data (alespoň 300 bodů) popř. navrhněte algoritmus pro generování syntetických vstupních dat představujících významné terénní tvary (kupa, údolí, spočinek, hřbet, ...).

Vstupní množiny bodů včetně níže uvedených výstupů vhodně vizualizujte. Grafické rozhraní realizujte s využitím frameworku QT. Dynamické datové struktury implementujte s využitím STL.

Nad takto vzniklou triangulací vygenerujte polyedrický digitální model terénu. Dále proveďte tyto analýzy:

- S využitím lineární interpolace vygenerujte vrstevnice se *zadaným krokem* a v *zadaném intervalu*, proveďte jejich vizualizaci s rozlišením zvýrazněných vrstevnic.

- Analyzujte sklon digitálního modelu terénu, jednotlivé trojúhelníky vizualizujte v závislosti na jejich sklonu.

- Analyzujte expozici digitálního modelu terénu, jednotlivé trojúhelníky vizualizujte v závislosti na jejich expozici ke světové straně.

Zhodnoťte výsledný digitální model terénu z kartografického hlediska, zamyslete se nad slabinami algoritmu založeného na 2D Delaunay triangulaci. Ve kterých situacích (různé terénní tvary) nebude dávat vhodné výsledky? Tyto situace graficky znázorněte.

Zhodnocení činnosti algoritmu včetně ukázek proveďte alespoň na tři strany formátu A4.

Hodnocení:

Krok	**Hodnocení**
Delaunay triangulace, polyedrický model terénu.	10b
Konstrukce vrstevnic, analýza sklonu a expozice.	10b
Triangulace nekonvexní oblasti zadané polygonem.	*+5b*
Výběr barevných stupnic při vizualizaci sklonu a expozice.	*+3b*
Automatický popis vrstevnic.	*+3b*
Automatický popis vrstevnic respektující kartografické zásady (orientace, vhodné rozložení).	*+10b*
Algoritmus pro automatické generování terénních tvarů (kupa, údolí, spočinek, hřbet, …).	*+10b*
3D vizualizace terénu s využitím promítání.	*+10b*
Barevná hypsometrie.	*+5b*
Max celkem:	**65b**

Čas zpracování: 3 týdny

Popis a rozbor problému + vzorce

Je dána množina bodů P = {p1, p2, ..., pn} v R^2. Úkolem je najít triangulaci T nad množinou P.

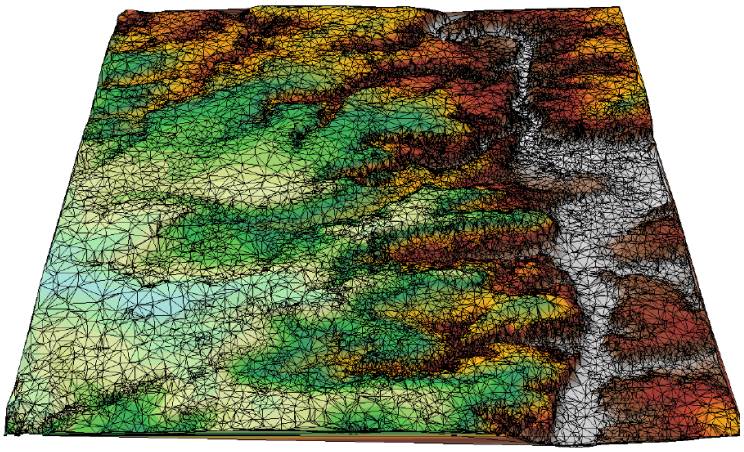
Triangulace T nad množinou bodů P, představuje takové planární rozdělení, které tvoří soubor m trojúhelníků t={t1,t2,...,tm} a hran, aby platilo (Bayer 2018):

- Libovolné dva trojúhelníky ti,tj ∈ T, (i ≠ j), mají společnou nejvýše hranu.
- Sjednocení všech trojúhelníků t ∈ T tvoří H(P).
- Uvnitř žádného trojúhelníku neleží žádný další bod z P.

<u>Použití triangulace</u>

Triangulace se nejvíce využívá v oblasti GIS a kartografie, kde se s jejím využitím tvoří digitální modely terénu (DMT). Tyto prostorové modely jsou tvořeny nad množinou bodů o známých souřadnicích x, y, z. Pro tvorbu podrobných modelů jsou často využívaná data laserového skenování. DMT se v GIS používá na nejrůznější analýzy, například analýza sklonu

reliéfu, orientace reliéfu, viditelnosti apod.. Dále se DMT používá pro vizualizaci. Používá se jako podklad v kartografických mapách nebo třeba ve 3D prostředí. Jedním z příkladů je vizualizace map ve 3D nebo využití DMT ve virtuálních světech.



Obr. 1 digitální model terénu, zdroj: (Bayer 2018)

Ve virtuálních světech se používá triangulace také k vizualizaci jiných prostorových dat, jelikož síť trojúhelníků vystihuje velmi dobře strukturu daného objektu. Pro „hladkou“ vizualizaci se množina bodů musí zahustit. Triangulace je po zahuštění detailnější, trojúhelníky jsou mnohem menší a nejsou pouhým okem viditelné, což vytváří efekt „hladkosti“ objektu.

V interpolacích se používá při převodu bodových jevů na plošné. Dále se triangulace používají v biometrii při detekci otisků prstů. Při skenování otisku prstů nad vytvořenými body vznikne triangulace a na základě této triangulace se rozhoduje, zda je otisk validní. V neposlední řadě se využívá Delaunay triangulace k vytváření Voronoi diagramů. Pro tvorbu Voronoi diagramů se používají středy kružnic opsaných jednotlivých trojúhelníků, které reprezentují jednotlivé Voronoi vrcholy. Spojením těchto vrcholů vznikne Voronoi diagram.

Triangulace se dají dělit podle geometrické konstrukce a podle použitých kritérií. Podle geometrické konstrukce se dělí na:

- Greedy triangulaci
- **Delaunay triangulaci**
- Minimum weight triangulace
- Triangulace s povinnými hranami

- Datově závislé triangulace

A podle použitých kritérií:

- Lokálně optimální triangulace
- Globálně optimální triangulace
- Multikriteriálně optimalizované triangulace

Algoritmus

Delaunay triangulace se dnes běžně používá a dala by se považovat za průmyslový standart. Delaunay triangulace maximalizuje minimální úhel (max-min kritérium) v trojúhelníku a je lokálně i globálně optimální vůči kritériu minimálního úhlu (Bayer 2018). Výsledné trojúhelníky delaunay triangulace se nejvíce ze všech triangulací blíží k rovnostranným trojúhelníkům, což je jedna z výhod delauny triangulace, jelikož minimalizuje tvorbu velmi ostrých trojúhelníků. Její další výhodou je jednoduchá implementace, která se dá napsat de-facto během „chvilky“. Delaunay triangulace využívá kružnice opsané, na jejímž obvodu leží dva body, které tvoří hranu Delaunay triangulace k nalezení třetího vrcholu trojúhelníku. Uvnitř libovolné kružnice opsané Delaunay triangulace neleží žádný další bod vstupní množiny.

Nad všemi konvexními čtyřúhelníky Delaunay triangulace je prováděna legalizace, což je operace prohození diagonály ve čtyřúhelníku. Je spočítáno kritérium pro obě varianty, následně je vybrána vhodnější varianta a v důsledku je, či není, diagonála prohozena. Trojúhelníky jsou po legalizaci lokálně optimální k max-min kritériu. Pokud leží čtyři body na kružnici, tak v takovém případě nezáleží na prohození diagonály, jelikož výsledná kritéria budou stejná. Taková triangulace se nazývá nejednoznačná.

Pro konstrukci Delaunay triangulace existuje několik přímých metod:

- Lokální prohazování
- **Inkrementální konstrukce**
- Inkrementální vkládání
- Rozděl a panuj
- Sweep Line

Vrstevnice je možné vytvořit dvěma hlavními způsoby, lineární interpolací a nelineární interpolací. Nelineární interpolace bere v úvahu skutečný tvar terénu, jelikož počítá i se sklonem okolních plošek apod. Tyto interpolace jsou velmi obtížné a těžko se algoritmizují. Lineární interpolace jsou na druhou stranu jednodušší, ale nevystihují přesně realitu. Spád a rozestup vrstevnic mezi dvěma body, mezi kterými se provádí interpolace, je konstantní (Bayer 2018). Při konstrukci vrstevnic dochází k hledání průsečnice roviny tvořenou trojúhelníkem z Delaunay triangulace a vodorovné roviny o určité výšce. Pokud je průsečnice úsečka, dochází k nalezení souřadnic bodů, které tvoří úsečku. Tento proces se opakuje nad všemi trojúhelníky v Delaunay triangulaci.

Sklon a orientace jsou dvě analýzy, které se často provádějí nad digitálním modelem terénu. Analýzy se používají v zemědělství, stavebnictví, hydrologii, geomorfologii apod. Obě analýzy jsou určovány výškovými poměry v trojúhelníku. Sklon je určený hodnotou gradientu, což je vektor maximálního spádu a orientace v bodě. Je dána jako azimut průmětu gradientu do roviny. Tyto analýzy jsou prováděny ve všech trojúhelnících v Delaunay triangulaci.

Popis algoritmu Inkrementální konstrukce formálním jazykem

V první kroku je nutné najít náhodný bod p_1 a k němu nejbližší p_2. Z těchto bodů se vytvoří hrana *e*. Dalším krokem (3) je nalezení bodu *p* z množiny *P*, který tvoří společně s body p_1 a p_2 nejmenší opsanou kružnici. V kroku 4 se zkontroluje, jestli se nehledaly kružnice opsané v polorovině, kde nebyl žádný bod. Tedy jestli není výsledný bod *null*. Pokud ano, prohodí se orientace hrany *e* a pokračuje se krokem 3. Dalším krokem (5) je vytvoření hran e_2 a e_3 z nového bodu *p*. V kroku 6 se přidají tyto hrany do active edge listu, což je list *AEL*, ve kterém se nachází hrany triangulace, ke kterým potencionálně existují další hrany. Poslední krok 7 přípravy algoritmu je přidání vytvořených hran do listu *DT* reprezentující Delaunay triangulaci.

Delaunay Triangulation Incremental (P, AEL, DT)

1: p_1 = rand(P), $||p_2 - p_1||_2$ = min.

2: e = (p_1p_2)

3: p = arg $\min_{\forall pi \in \sigma L(e)}$ r(k_i), k_i = (a,b, p_i), e = (a, b)

4: Pokud $\nexists$ p, prohoď orientaci e ← (p2p1). Jdi na 3.

5: e_2 = (p_2, p), e_3 = (p, p_1)

6: AEL ← e, AEL ← e2, AEL ← e3

7: DT ← e, DT ← e2, DT ← e3

Teď přichází na řadu jádro algoritmu. Vše se děje ve while cyklu, který běží, dokud nebude active edge list prázdný. Na začátku cyklu se vyjme první hrana *e* z active edge listu. Dále je prohozena její orientace, aby se hledaly kružnice opsané v polorovině, ve které se ještě nehledalo. V kroku (11) je hledán bod *p*, který tvoří nejmenší opsanou kružnici stejně jako v kroku 3, s tím rozdílem, že se používají body, které tvoří hranu *e* vyjmutou z *AEL* na začátku cyklu. V dalším kroku se testuje, jestli v této polorovině existuje takový bod *p*. Pokud ne, tak tato iterace končí. Pokud ano, tak jsou v dalším kroku vytvořeny hrany e_2 a e_3 z nalezeného bodu *p*. Dále je hrana *e* přidána do listu *DT.* V posledním kroku se volá funkce *add*, která rozhodne, zda se hrany e_2 a e_3 přidají jen do listu *DT* nebo i do listu *AEL*.

8: while AEL not empty:

9: AEL → e, e = (p_1p_2)

10: e = (p_2p_1)

11: p = arg $\min_{\forall pi \in \sigma L(e)}$ r(k_i), k_i = (a,b, p_i), e = (a, b)

12: if ∃p :

13: e_2 = (p_2, p); e_3 = (p, p_1)

14: DT ← e

15: add(e_2,AEL,DT), add(e_3,AEL,DT)

Funkce *add* vytvoří novou hranu *e´* z bodů hrany vstupní. V druhém kroku kontroluje, zda již taková hrana existuje uvnitř listu *AEL.* Pokud ano, tak je hrana *e´* odstraněna z *AEL*. Pokud ne, tak je hrana *e* přidána do *AEL*. Na konci funkce je v obou případech hrana přidána do *DT*.

Add(e = (a, b), AEL, DT)

1: e´ = (b, a)

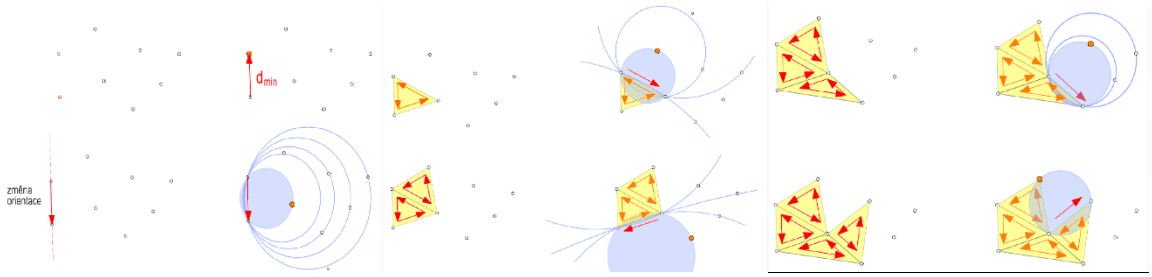
2: if (e´ ∈ AEL)

3: AEL → e´

4: else:

5: AEL ← e

6: DT ← (a, b)



Obr. 2, 3, 4 Ilustrace inkrementální konstrukce, zdroj: (Bayer 2018)

Problematické situace

Problém, na který jsem narazil, jsou body v mřížce. Pokud se aplikace pokusí provést *Delaunay* triangulaci na body v pravidelné mřížce, začnou se vytvářet degenerované nebo žádné trojúhelníky a algoritmus selže. Ukázka takových bodů je vidět na obrázku číslo 5. Tyto body jsou ze souboru DMT_B_sub.txt. Problém jsme diskutovali i na cvičení, ale nedokázali jsme dojít k jinému vysvětlení, než že za selhání algoritmu může pravidelné uspořádání bodů a kolineární body. K přesnějšímu vysvětlení problému jsme ale nedošli.

Obr. 5 body ze souboru DMT_B_sub.txt

Druhým (menším) problémem je automatický popis vrstevnic, který jsem zakomponoval do aplikace jako bonusovou úlohu. Popis vrstevnic je v některých případech překryt samotnou vrstevnicí, což není úplně správně. Popisek se tvoří zhruba u 20 % všech linií, které tvoří vrstevnice, aby nebyl výsledek přeplněný. Při vytvoření jakékoliv linie dochází k vygenerování

náhodného čísla od 0 do 1, které určí, zda se na této linii bude tvořit popisek či nikoliv. To alespoň trochu řeší problém s překrytím popisku vrstevnicí, jelikož je možné generovat vrstevnice znovu a popisky se vygenerují u jiných linií. Takto je možné vytvořit přijatelnější výsledek.

Vstupní data, formát vstupních dat, popis

Aplikace nabízí dvě možnosti vstupních dat. První možnost je náhodné generování bodů, které umožňuje uživateli rychlé vyzkoušení aplikace bez použití vlastních dat. Druhá možnost je nahrání vlastních bodů v textovém souboru. Textový soubor musí mít zaspaný na každém řádku jeden bod ve formátu souřadnice „x y z“ viz. soubor test.txt. Jednotlivé souřadnice mohou být odděleny téměř „jakkoliv“, jelikož je možné nastavit oddělovač v GUI. Souřadnice x a y bodů jsou při nahrávání přetransformované na stupnici 0 - 1, takže nezáleží, v jakém zobrazení se vstupní data nachází.

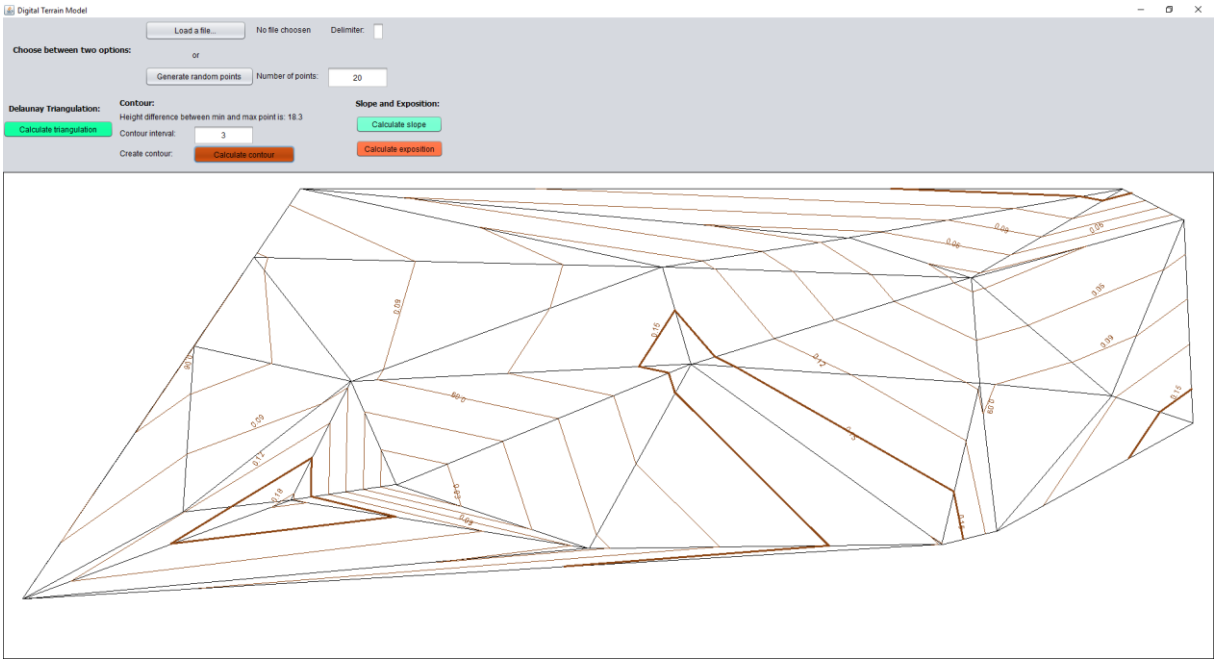
Výstupní data, formát výstupních dat, popis

Veškerá výstupní data jsou zobrazena pouze v grafické podobě. Pokud uživatel využije veškeré funkce aplikace, je schopný vykreslit body, polyedrický model terénu (spočítaná triangulace), vrstevnice, sklon a expozici. K vrstevnicím se navíc vykreslí jejich popis a ke sklonu a expozici se vykreslí legenda.

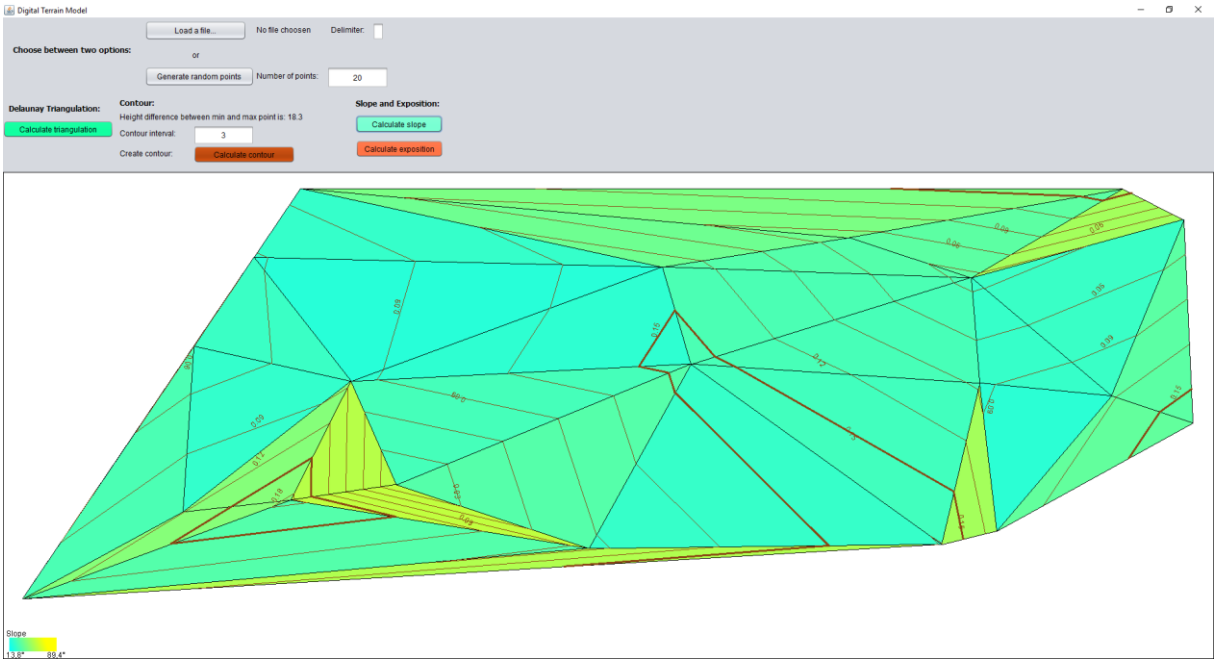
Body, ze kterých se tvoří triangulace, se vykreslují jako křížky (body se pro větší přehlednost nevykreslují po spuštění dalších funkcí). Polyedrický model terénu je vykreslován po jednotlivých trojúhelnících. Vrstevnice jak zdůrazněné, tak nezdůrazněné jsou vykreslovány jako liniový prvek. Sklon a expozice jsou znázorněny barevnou výplní trojúhelníku podle určité barevné stupnice. Popisky vrstevnic a texty v legendě jsou vykreslené řetězce. Barevné stupnice legendy jsou vytvořené pomocí datové struktury *GradientPaint.*

Printscreen vytvořené aplikace

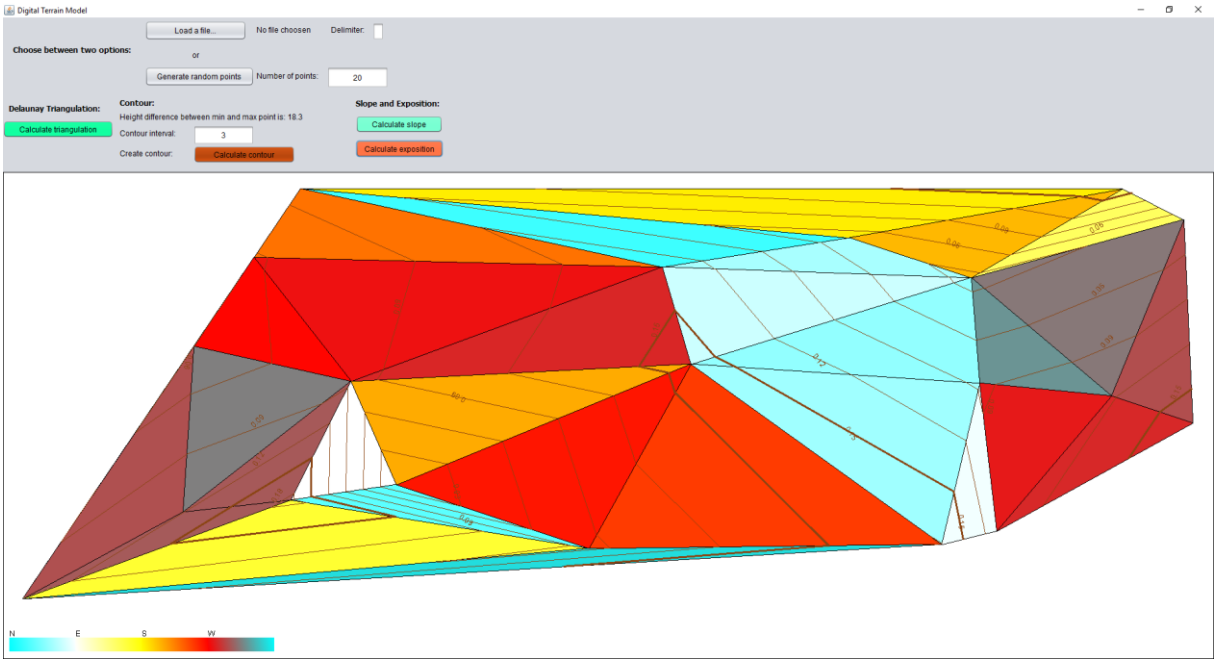
Na obrázku číslo 6 je možné vidět triangulaci pro dvacet náhodně vygenerovaných bodů s vykreslením vrstevnic i s jejich popiskem. Na obrázku 7 je navíc vykreslený sklon a na obrázku 8 je místo sklonu expozice. Na obrázku 11 je ze zajímavosti vykreslena triangulace a expozice pro deset tisíc náhodných bodů.



Obr. 6 triangulace náhodných bodů s vrstevnicemi

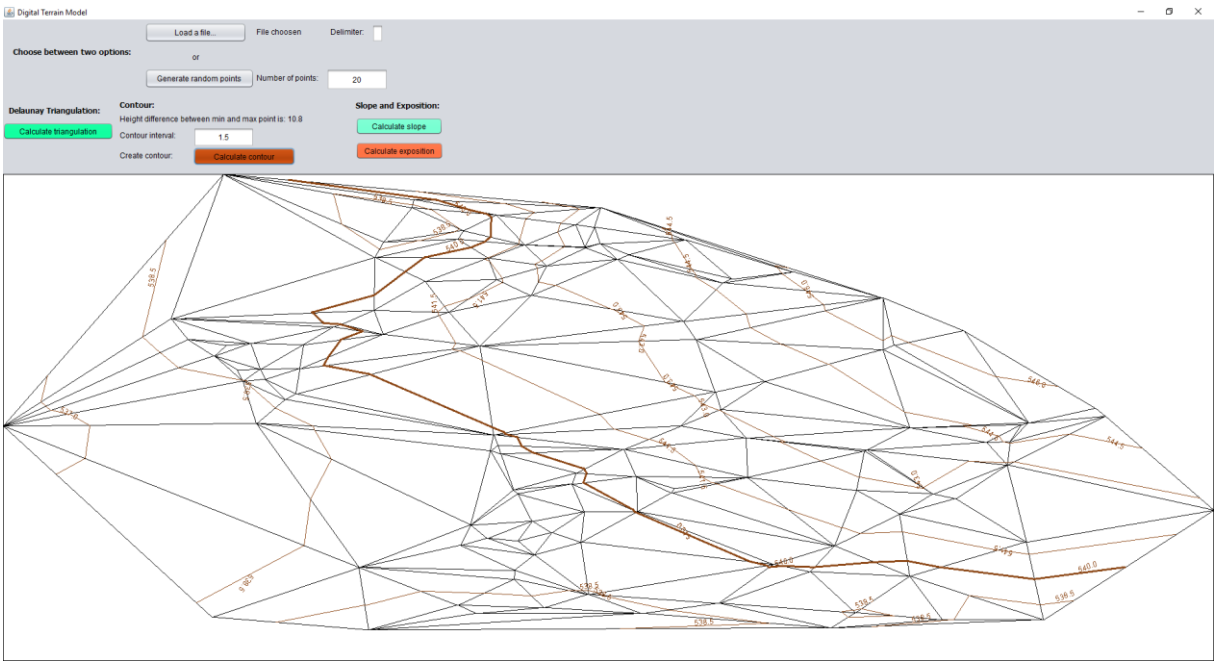


Obr. 7 triangulace náhodných bodů s vrstevnicemi a sklonem

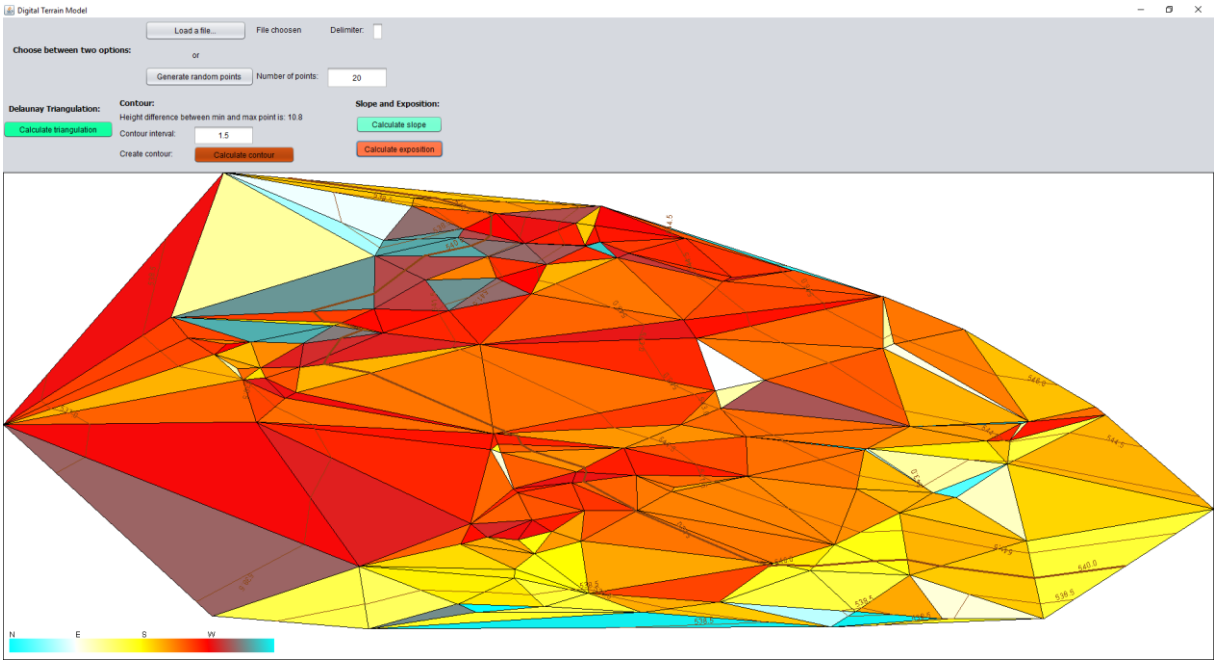


Obr. 8 triangulace náhodných bodů s vrstevnicemi a expozicí

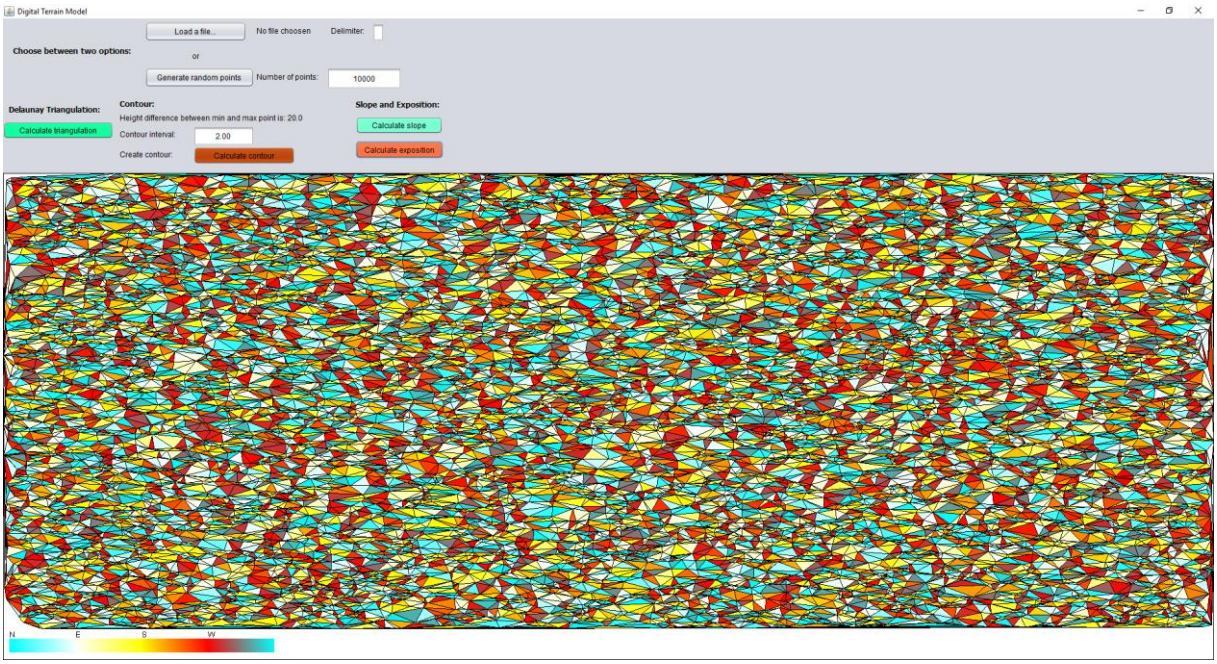
Na obrázku 9 je zobrazena triangulace a vrstevnice s popiskem nad skutečnými daty, které byly naměřeny na kartografickém cvičení. Na obrázku 10 je nad těmito daty zobrazena ještě expozice. Tyto data se nachází v souboru test.txt. Přesnost těchto dat je ale neznámá.



Obr. 9 triangulace bodů ze souboru test.txt



Obr. 10 triangulace a expozice nad body ze souboru test.txt



Obr. 11 triangulace a expozice pro deset tisíc náhodných bodů

Dokumentace: popis tříd, datových položek a jednotlivých metod

Aplikace se skládá z osmi tříd. Dvě třídy reprezentují vlákna, tři třídy reprezentují datové struktury, jedna algoritmy, jedna grafické rozhraní a jedna vykreslování na plátno. Třída *Point3D* reprezentuje datovou strukturu, která má tři proměnné *double* reprezentující souřadnice x, y, z. Třída *Point3D* se skládá jen z metod, jako jsou getry a setry pro všechny proměnné. Další třídou reprezentující datovou strukturu je třída *Triangle,* reprezentující trojúhelník. Třída má tři proměnné *Point3D*, reprezentující jednotlivé vrcholy trojúhelníku a dvě proměnné *double*, které reprezentují sklon a expozici. Třída má tři metody, první metoda *getNormalVec* počítá normálový vektor trojúhelníku. Další dvě metody tento vektor využívají. Metoda *getSlope* počítá sklon trojúhelníku a metoda *getExposition* počítá expozici trojúhelníku. Poslední třídou, která reprezentuje datovou strukturu, je třída *Edge*. Třída má dvě proměnné *Point3D* reprezentující začátek a konec hrany, jednu proměnnou *boolean*, která značí, jestli má či nemá být hrana zvýrazněna a proměnnou *double*, která je náhodná a určuje, zda se u této vrstevnice bude tvořit popisek či ne. Třída má tři metody. První metoda *swap* vymění koncový a startovní bod hrany a tím změní její orientaci. Druhá metoda *swappedEdge* je podobná metodě první, ale místo aby měnila orientaci dané hrany, vytváří hranu novou s opačnou orientací. Poslední metoda této třídy *equals* porovnává hranu s objektem. Pokud je porovnávaný objekt totožný s hranou (tzn. je to stejná hrana), metoda vrací *true*, jinak vrací *false*.

Dvě třídy rozšiřující třídu *SwingWorker* reprezentující vlákna jsou *GenerateWorker* a *CalculateWorker*. Obě třídy mají metody *doInBackground* a *done.* Metoda *doInBackground* pracuje v pozadí v novém vláknu a v případě třídy *GenerateWorker* generuje buďto náhodné body nebo vytváří body z nahraného textového souboru. Na konci metody dochází k volání metody pro výpočet výškového rozdílu mezi minimem a maximem generovaných bodů. Pokud jsou body nahrané z textového souboru, tak je ještě volána metoda, která transformuje souřadnice x a y na stupnici 0 – 1. Po skončení této metody se automaticky volá metoda *done*, která vytvoří zprávu o výškovém rozdílu pro uživatele a přepíše interval vrstevnic, aby uživatel nemusel interval vymýšlet. Následně metoda *done* volá metodu pro překreslení plátna. Třída *GenerateWorker* má ještě metodu *parse*, která rozdělí řádek na jednotlivé elementy a převede je na *double*. Tato metoda se volá při načítání dat z textového souboru.

Ve třídě *CalculateWorker* počítá metoda *doInBackground* jeden z procesů: Delaunay triangulace, vytváření vrstevnic, sklon nebo expozici. V případě expozice dochází k převádění „z“ souřadnic na stupnici 0 - 1 a následně k výpočtu expozice. Převod souřadnic probíhá také při počítání sklonu, pokud již převod neproběhl. Po výpočtu sklonu dochází ještě k nalezení minimálního a maximálního sklonu. Pokud jsou počítány vrstevnice a již proběhl převod „z“ souřadnic, tak jsou „z“ souřadnice převedeny zpátky na původní hodnoty a dochází k vytvoření vrstevnic. Metoda *done* volá metodu pro překreslení plátna. Ve třídě *CalculateWorker* se nachází ještě dvě další metody. Metoda *scalingZ*, která převede „z“ souřadnice na stupnici 0 – 1 a metoda *scalingZBack*, která převede „z“ souřadnice zpátky na původní hodnoty.

Nejobsáhlejší třída *Algorithms* obsahuje téměř veškeré metody, ve kterých probíhají výpočty. Třída má dvě proměnné, *double* EPSILON a *enum* OrientationEnum. Proměnná EPSILON je velmi malá hodnota, která se používá při porovnání místo nuly. Proměnná OrientationEnum určuje orientaci bodu vůči úsečce. Jedna z hlavních metod je metoda *delaunay,* která vypočítává Delaunay triangulaci. Tato metoda volá několik dalších metod, které provádějí dílčí výpočty. Metoda *minimalBoundingCircle* je jednou z těchto metod a volá další dvě metody. Metoda hledá body v jedné polorovině od hrany z množiny bodů pomocí metody *getOrientation,* která vypočítá determinant a na základě hodnoty determinantu vrátí orientaci bodu vůči hraně. Jakmile metoda *minimalBoundingCircle* má bod se správnou orientací, volá metodu *circleRadius,* která spočítá poloměr opsané kružnice za pomoci metody *dist,* jenž počítá vzdálenost bodů v rovině. Následně metoda *minimalBoundingCircle* vrátí bod, který tvoří nejmenší opsanou kružnici se vstupní hranou. Poslední metodu, kterou metoda *delaunay* volá je metoda *addToAel.* Tato metoda testuje, zdali vstupní hrana již existuje ve vstupním listu či nikoliv. Pokud ano, tak ji smaže.

Samostatná metoda *scaling* ve třídě *Algorithms* transformuje souřadnice x a y bodu na stupnici 0 - 1. Další samostatnou metodou je metoda *heightDifference*, která spočítá výškový rozdíl minima a maxima vytvořených bodů. Třída *Algorithms* obsahuje dalších sedm metod. Čtyři z těchto metod spolu souvisí, jelikož jsou volány při počítání sklonu a expozice. Metoda *det* počítá determinant 3x3, metoda *dotProd* počítá skalární součin, metoda *len* počítá velikost vektoru a metoda *angle* počítá úhel mezi dvěma vektory. Poslední tři metody vytvářejí vrstevnice. Metoda *calcContourPoints* počítá průsečíky vrstevnic se stranou

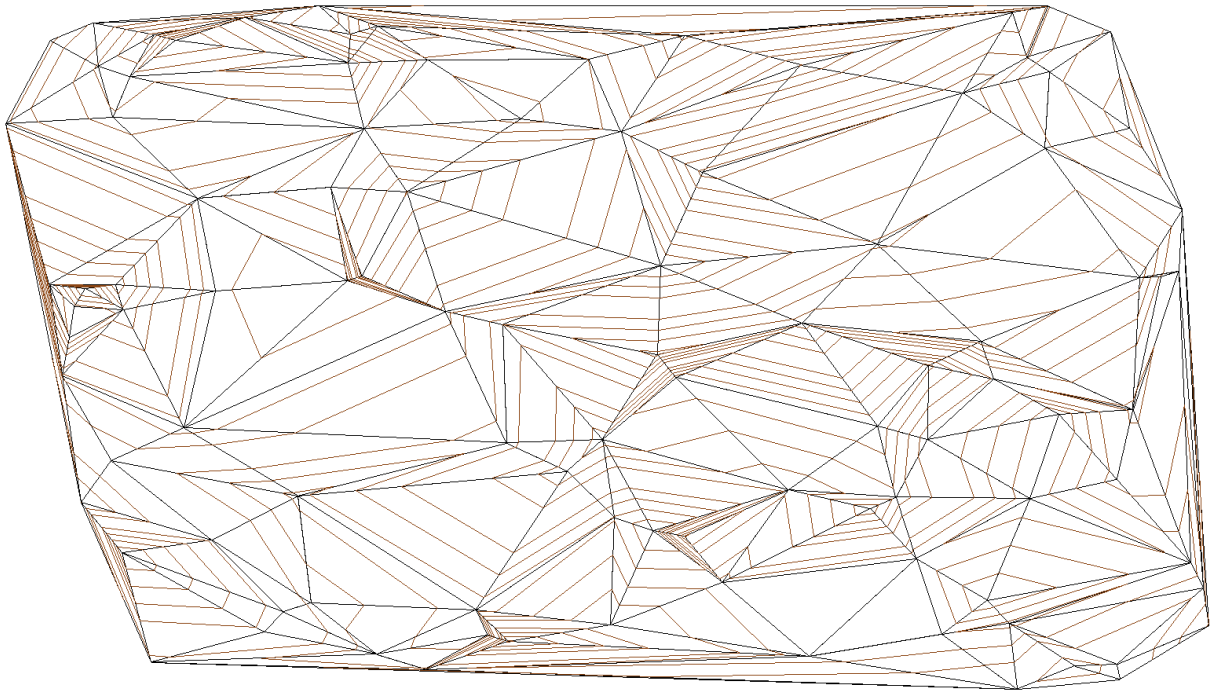
trojúhelníku. Metoda *calcContours(Triangle t, double interval)* vytváří list vrstevnic v daném trojúhelníku a poslední metoda *calcContours(List <Triangle> t, double interval)* vytváří list všech linií reprezentující vrstevnice.

DrawPanel je třída, která zajišťuje veškeré vykreslování na plátno. Tato třída má několik proměnných, jako jsou *listy*, *pole* a *Path2D.* Tyto datové struktury umožňují jednoduché vykreslování. Kromě konstruktoru a předdefinované metody *paintComponent* má třída tři metody. Metodu *affineTransform,* která transformuje a škáluje datovou strukturu *Path2D,* aby byla správně vykreslena, metodu *colorScale*, která převádí hodnotu na stupnici 0 – 255 a metodu *drawRotate*, která otáčí vstupní text o vstupní úhel. Metoda *paintComponent* se stará o veškeré vykreslování. Vykresluje body, linie, plochy a texty. Veškeré vykreslované elementy jsou škálované podle velikosti plátna ze stupnice 0 - 1.

Poslední třídou je třída *GUI*, která reprezentuje grafické rozhraní. V této třídě se nachází obě již zmíněné třídy reprezentující vlákna. Třída má několik proměnných s různými datovými strukturami. Obsahuje dvě proměnné reprezentující vlákna, dále pak dvě proměnné reprezentují *Int*, *boolean*, tři reprezentující *double* a jednu reprezentující *JFileChooser*. Dále také obsahuje veškeré proměnné reprezentující tlačítka apod. v GUI. Nejdůležitější metoda třídy *GUI* je metoda *main*, která tvoří celé grafické rozhraní a nastavuje jméno aplikace. Dále pak třída obsahuje metody, které se volají po stisknutí některého z tlačítek grafického rozhraní. Tyto metody jsou vesměs podobné. Metoda nastaví jeden z parametrů a spustí jedno z vláken. Podle nastaveného parametru v daném vláknu proběhne proces, který dané tlačítko grafického rozhraní reprezentuje.

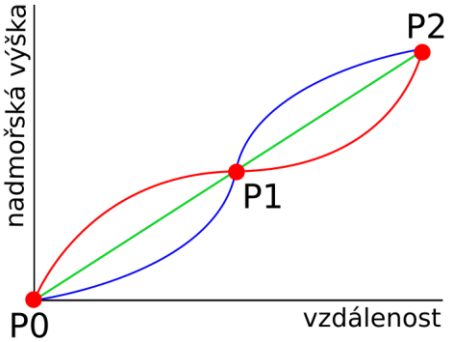
Zhodnocení výsledného digitálního modelu terénu

Výsledný digitální model terénu (ukázka viz Obr. 12) rozhodně nelze označit jako ideální. Prezentovaný výsledek může posloužit spíše jako náhled na danou část zemského povrchu, získání prvotní informace o míře členitosti terénu, nemůže však posloužit jako věrný reprezentant digitálního modelu daného výseku krajiny.



Obr. 12 Ukázka výsledného digitálního modelu terénu

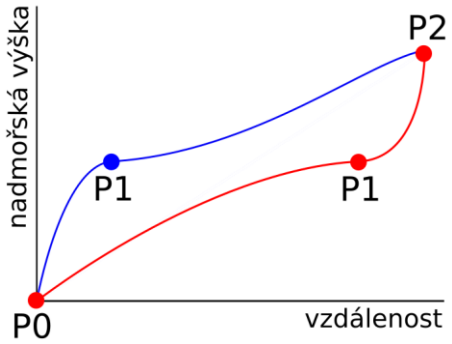
Za hlavní nevýhodu modelu z výpočetního hlediska lze označit zvolenou interpolační metodu mezi dvěma body o známé nadmořské výšce – lineární interpolaci. Při této interpolaci se mezilehlý bod dvou známých bodů nachází přesně v polovině a jeho nadmořská výška je průměrem obou bodů – interpolovaný bod tedy leží na přímce (viz Obr. 13 – zelená úsečka).



Obr. 13 Různý tvar křivky prokládané známými body (P0 a P2) a interpolovaným bodem P1 (ukázka), vlastní tvorba

Přímka však neumožňuje dostatečně reflektovat některé reliéfní tvary či jejich části (úpatí, spočinek), které se nacházejí na zemském povrchu. U vrcholů pak dochází jejich výraznému „zešpičatění“, ačkoliv v přírodě jsou v našich zeměpisných podmínkách vrcholy spíše zaoblené. V případě velmi řídké množiny bodů může pak docházet k tomu, že plocha jednoho trojúhelníku by měla reflektovat všechny části kopce nebo hory (úpatí, úbočí,

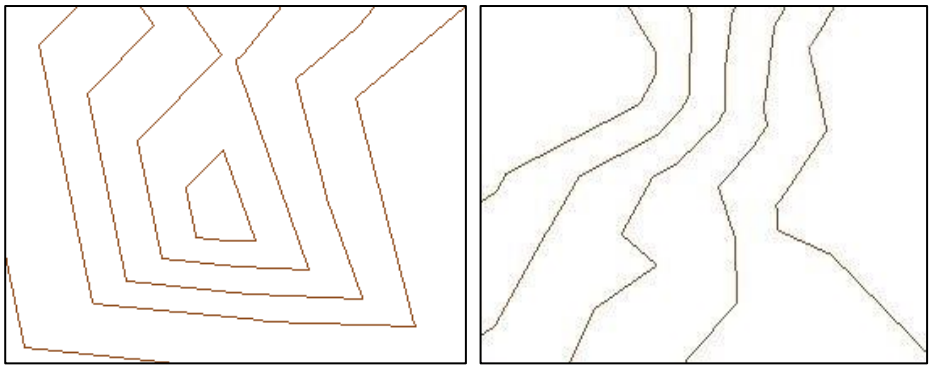
vrchol) - to však metoda lineární interpolace nemůže nikdy splnit. Vhodnější, nicméně z programátorského hlediska mnohem složitější, by bylo využít jinou interpolační metodu – např. metodu radiálních bázových funkcí (spline) nebo kriging a proložit body o známé nadmořské výšce křivkou namísto přímky. Interpolovaný bod o stejné nadmořské výšce (jako v případě jeho volby v lineární interpolaci) se pak bude nacházet např. blíže úpatí nebo blíže vrcholu – ukázka viz Obr. 14. Interpolační metoda by měla být volena s ohledem na daný typ reliéfu (stáří, míru eroze atp.).



Obr. 14 Různá poloha interpolovaného bodu P1 v důsledku použití jiné interpolační metody (ukázka), vlastní tvorba

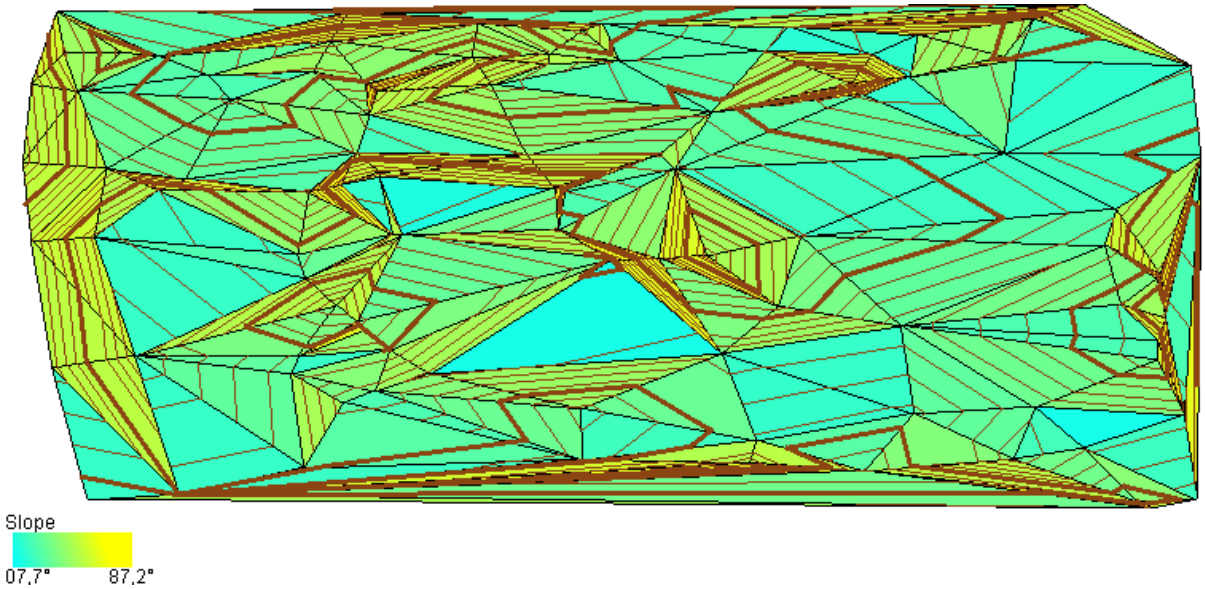
Uvedenou slabinu modelu (použití lineární interpolace) lze poměrně snadno eliminovat i jiným způsobem, a to zahuštěním měřených bodů na vstupu do aplikace. Bohužel získání dat s vyšším rozlišením bude pravděpodobně cenově nákladnější a jejich zpracování následně výpočetně náročnější.

Pokud se na model podíváme více z kartografického hlediska, jako nevyhovující se jeví znázornění vrstevnic jako úseček. Zde by bylo na místě opět tyto úsečky nahradit křivkou, která by lépe reprezentovala průběh reliéfu v daném území – v přírodě se vyskytuje minimum ostrých hran, naopak díky různým typům eroze (vodní, větrná) je většina prvků reliéfu zaoblená. Nahrazení úseček křivkou by opět kladlo zvýšené nároky na programátora. Druhým řešením je opět získání dat z vyšším rozlišením, což bude mít za důsledek vizuální zaoblení vrstevnic. Ukázka vrstevnic z řídké a naopak husté množiny bodů viz Obr. 15.



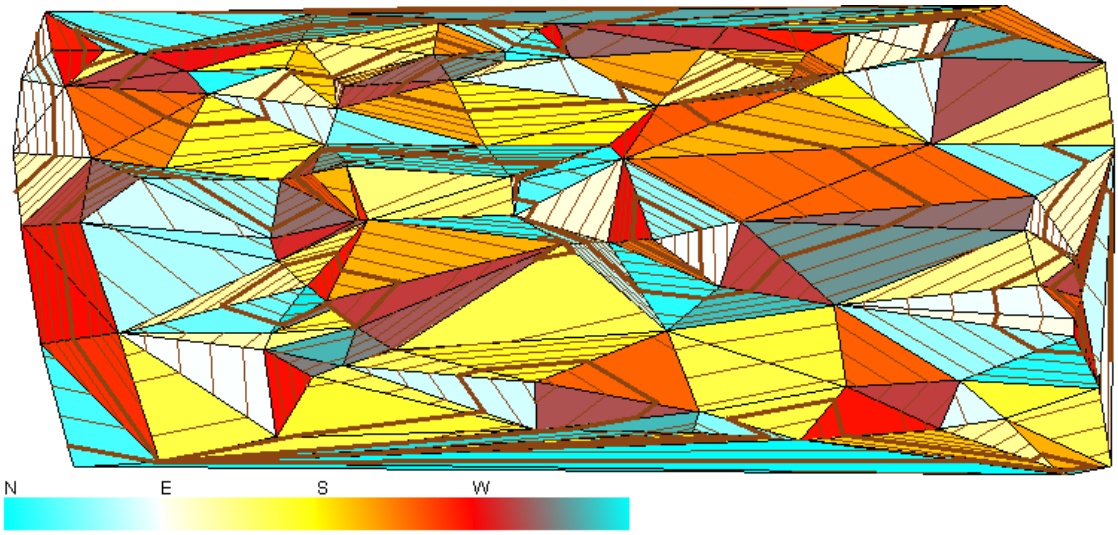
Obr. 15 Řídká síť měřených bodů vytváří nerealistické prvky reliéfu (vlevo), hustá síť měřených bodů naopak vrstevnice zaobluje (vpravo), vlastní tvorba

Naopak vizualizace sklonu reliéfu a expozice reliéfu jednotlivých trojúhelníků se jeví jako kartograficky zdařilá. V případě sklonu reliéfu byla využita tyrkysovo-žlutá stupnice (žádný sklon až maximální sklon), která dobře reprezentuje danou charakteristiku – viz Obr. 16.



Obr. 16 Vizualizace sklonu reliéfu

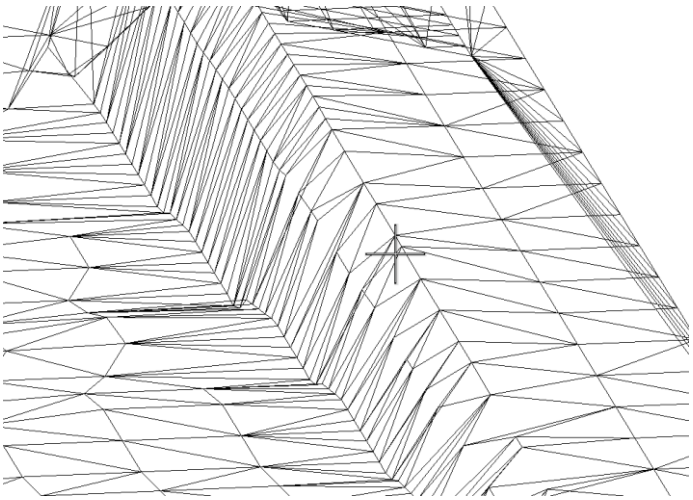
Pro znázornění expozice reliéfu Delaunayho trojúhelníků pak byla zvolena čtyřbarevná spojitá stupnice – tyrkysová barva pro sever, bílá pro východ, sytě žlutá pro jih a červená pro západ – ukázka viz Obr. 17.



Obr. 17 Vizualizace expozice reliéfu

Hlavní slabina algoritmu založeného na 2D triangulaci spočívá především v nedostatečném vystihnutí tvaru některých reliéfních prvků. Jak již bylo zmíněno výše, tento problém nastává zejména v případě řídké vstupní množiny měřených bodů u některých reliéfních tvarů jako např. úpatí, úbočí kopce nebo jeho vrchol.

V případě husté množiny bodů však může tento problém přetrvávat i nadále. Bayer (2018) jako příklad udává poldr v Nizozemsku, u kterého dochází k nedostatečnému vystižení jeho hrany (viz Obr. 18). Jako možné řešení tohoto problému autor uvádí využití tzv. Data Dependent Trangulation, která představuje optimalizaci *„vstupní triangulace s využitím heuristik či genetických algoritmů“* (Bayer, 2018, s. 93).



Obr. 18 Nedostatečné vystižení hrany poldru, Bayer (2018)

Představený digitální model terénu by bylo také vhodné vylepšit po vizuální stránce. Zcela chybí popis vrstevnic, vhodná by byla též realizace barevné hypsometrie, která by modelu dodala vjem plastičnosti. Tato vylepšení však nakonec nebyla implementována z důvodu jejich složitosti a časové náročnosti.

Závěr, možné či neřešené problémy, náměty na vylepšení

Výsledná aplikace podle mého názoru splňuje zadání. Navíc byla implementována jedna bonusová úloha a malá vylepšení viz. níže. Veškeré hlavní algoritmy (*Delaunay* triangulaci, tvorba vrstevnic, sklon a expozice) byly konstruovány na cvičeních za pomoci všech studentů. Hodnocení výsledků a nastínění problémů již bylo provedeno výše, a tudíž přejdu rovnou na vylepšení.

Vylepšení, které mě napadlo, bylo i implementováno. Vylepšení spočívá v počítání výškového rozdílu mezi minimem a maximem vytvořených bodů. Následně tento rozdíl zobrazím v grafickém rozhraní a přepíši nabízený interval vrstevnic. Tím dám uživateli informaci, jaký základní interval vrstevnic by měl zvolit, aby vypadal výsledek esteticky příjemně. Dále jsem přidal do GUI možnost nastavit oddělovač při načítání dat ze souboru.

Seznam literatury

BAYER, T. 2018. *Rovinné triangulace a jejich využití: Greedy Triangulation. Delaunay Triangulation. Constrained Delaunay Triangulation. Data Dependent Triangulation. DMT.* [elektronický zdroj]. Praha. Dostupné také z: https://web.natur.cuni.cz/~bayertom/index.php/teaching/algoritmy-pro-tvorbu-digit-map