

Západočeská univerzita v Plzni
Fakulta aplikovaných věd
Katedra informatiky a výpočetní techniky

Bakalářská práce

Optimalizace triangularizovaného modelu terénu pro výpočet vrstevnic

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů.

V Plzni, dne 6. května 2015

Christine Baierová

Abstrakt

Práce se zabývá možnostmi úprav v nepravidelných trojúhelníkových sítích na základě lokálního prohazování hran. Cílem je síť optimalizovat tak, aby na ní mohly být automaticky vypočítány co nejlepší vrstevnice. Rozhodnutí, zda tato kombinace může vyprodukovat lepší vrstevnice, se děje na základě použitého kritéria hodnocení kvality vrstevnic.

Abstract

This work explores possibilities in the area of optimization triangulated irregular network based on local edge swapping. The goal of this work is to modify triangulated irregular network (TIN) for producing the best contour lines. The decision which combination is better for computing contour lines is based on used criterion of quality.

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala vedoucí své bakalářské práce Prof. Dr. Ing. Ivaně Kolingerové za poskytnuté materiály, rady a připomínky.

Rovněž bych ráda poděkovala své rodině, která při mě po celou dobu studia stála a podporovala mě.

Obsah

1	Úvod	1
2	Teoretická část	2
2.1	Nepřavidelná trojúhelníková síť - TIN	2
2.1.1	Delaunay triangulace - DT	4
2.1.2	Lokálně minimální triangulace - LMT	4
2.2	Vrstevnice	5
2.2.1	Artefakty	5
2.2.2	Lokální prohazování hran	7
2.3	Kritéria hodnocení kvality	9
3	Navrhované řešení	10
3.1	Vlastní návrh řešení	11
3.2	Aplikace	11
3.2.1	Zdrojové soubory	11
3.2.2	Důležité datové struktury	12
3.3	Průchod sítí	12
3.4	Použité algoritmy	13
3.4.1	Test konvexity	13
3.4.2	Test průsečíku úseček	14
3.5	Kritéria pro triangularizovanou síť	15
3.6	Kritéria pro hodnocení kvality vrstevnic	15
3.6.1	Kritérium poměru délek na jedné vrstevnici	16
3.6.2	Poměr délek vrstevnic v množině	17
3.6.3	Úhlové kritérium	18
4	Experimenty a výsledky	20
4.1	Předběžné experimenty	20
4.2	Experimenty s vlastním řešením	25
4.2.1	Experiment 1: kritérium kratší diagonály	26
4.2.2	Experiment 2: kritérium poměru délek	28

4.2.3	Experiment 3: Kritérium poměru délek na množině . .	30
4.2.4	Experiment 4: Úhlové kritérium	33
5	Závěr	35

1 Úvod

Jedním z problémů v současné kartografii je proces výpočtu vrstevnic na digitálním modelu terénu. Tento proces je zatížen chybami, které je třeba následně opravit dalšími zásahy. Tyto chyby jsou snadno odhalitelné okem zkušeného kartografa, avšak jejich automatická detekce není snadná. Není totiž známo takové kritérium, které by dokázalo předcházet vzniku všech chyb. Kritérium produkující uspokojivé vrstevnice například kopcovitého terénu se může projevit jako krajně nevhodné při produkci vrstevnic terénu rovinatého.

Pro digitální reprezentaci terénu se v praxi často používají nepravidelné trojúhelníkové sítě, jež se terénu dobře přizpůsobují. Tyto sítě však nemusí být vhodně triangulované pro výpočet vrstevnic a je třeba je následně upravit.

Úkolem této bakalářské práce bylo prostudovat vybrané triangulační metody, výpočet vrstevnic a hodnocení jejich kvality a na základě získaných poznatků vytvořit aplikaci, která doplní poskytnuté programové vybavení. Jak bylo těchto cílů dosaženo je popsáno v následujících kapitolách:

- Kapitola 2 je teoretickou částí práce. Zabývá se úvodem do problematiky výpočtu vrstevnic na digitálním modelu terénu a vysvětluje nejdůležitější pojmy potřebné k porozumění problematiky.
- Kapitola 3 je návrhem řešení, pro které jsem se rozhodla po provedení předběžných experimentů na poskytnutém programovém vybavení a po prostudování teorie.
- Kapitola 4 se zabývá experimenty a výsledky, kterých bylo dosaženo.
- Kapitola 5 je shrnutím celé práce, zhodnocením dosažených výsledků a doplněné návrhem, co by bylo možné vylepšit do budoucna.

K práci je rovněž přiloženo CD, které obsahuje spustitelnou aplikaci, potřebná data, zdrojové soubory a uživatelskou příručku.

2 Teoretická část

Části zemského povrchu převedené do digitální podoby se v odborné literatuře nazývají **Digitální model terénu (DMT)** [5]. Základem je množina bodů s určitými vlastnostmi.

Pro kartografické účely se nejčastěji k reprezentaci terénu používají vrstevnice, tedy linie spojující body o stejné nadmořské výšce. Pro výpočetní účely se však používá reprezentace **nepravidelnou trojúhelníkovou sítí**, tzv. **TIN**.

Oba modely spolu úzce souvisí, neboť v trojúhelníkové síti lze najít průsečky triangulace s výškou z rozsahu $\langle z_{min}; z_{max} \rangle$, na kterých jsou vrstevnice vypočítány [12]. Po výpočtu vzniknou přímky po částech lineární, které po vyhlazení vytvoří křivky. Opačným způsobem lze navzorkovat body na vrstevnicích a mezi nimi vypočítat trojúhelníkovou síť.

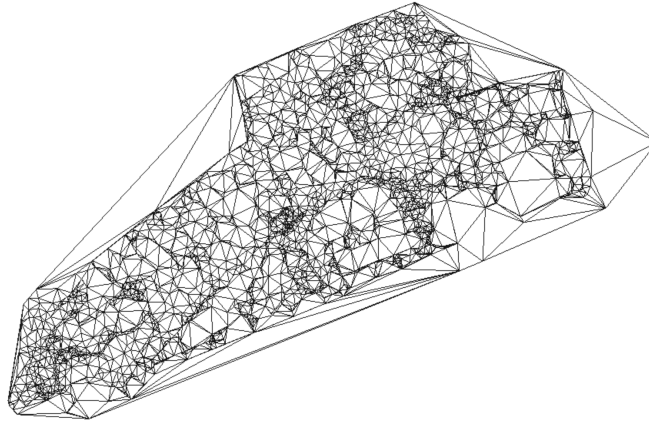
V následujících podkapitolách je podrobněji rozebrána problematika nepravidelných trojúhelníkových sítí, triangulací, vrstevnic a kritérií hodnotící kvalitu vrstevnic.

2.1 Nepravidelná trojúhelníková síť - TIN

TIN (Triangulated irregular network) je jednou z nejoblíbenějších a nejčastěji používaných metod pro digitální reprezentaci terénu. TIN reprezentuje povrch jako soubor trojúhelníků o různých velikostech. Vrcholy trojúhelníků jsou body v terénu se známou polohou a (nadmořskou) výškou v rámci sítě. Ilustrační příklad nepravidelné trojúhelníkové sítě je na obrázku 2.1.

Spojnicí mezi dvěma vrcholy v síti představuje hrana trojúhelníku. Hrany se neprotínají v jiných místech než ve vrcholech trojúhelníků. Tři hrany tedy tvoří jeden trojúhelník v TIN síti, přičemž každá vnitřní hrana je součástí právě dvou trojúhelníků. Celou síť tvoří množina sousedících a nepřekrývajících se trojúhelníků [2].

Proces přeměny množiny bodů na síť se nazývá **triangularizace**. Způsobů, jak triangularizovat danou síť, je mnoho. Existují triangularizace tzv. *globálně optimální*, kdy jsou všechny trojúhelníky optimální vzhledem k za-



Obrázek 2.1: Ukázka TIN.

danému kritériu a neexistuje jiná triangulace, která by dosáhla lepší hodnoty posuzovaného kritéria alespoň u jednoho trojúhelníku. [10].

Pro doplnění je třeba ještě dodat, že metoda *brutální síly* nepřipadá v hledání globálně optimální sítě v úvahu, neboť možností, jak ji vytvořit, je velké množství.

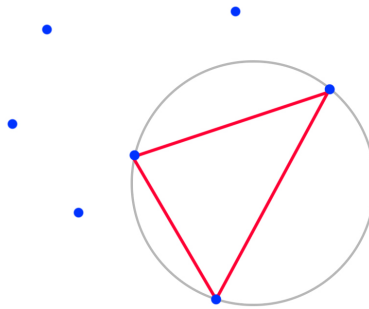
Dále existují triangularizace *lokálně optimální*, kde každá dvojice trojúhelníků se společnou hranou je triangularizována optimálně vzhledem k danému kritériu. Pro danou množinu bodů existuje více lokálně optimálních triangulací, přičemž každá z nich optimalizuje jiné kritérium [10].

Základem triangulačních algoritmů bývá většinou právě některé z lokálních kritérií. Tato kritéria lze rozdělit na úhlová a hranová. Úhlová kritéria jsou více používaná a jejich princip je založen na vytváření takových trojúhelníků, aby byly co nejvíce rovnostranné. Jinak řečeno se algoritmus vyhýbá vzniku příliš malých, velkých, či „úzkých“ trojúhelníků. Těchto trojúhelníků se dosahuje maximalizováním minimálního úhlu trojúhelníku (Delaunay triangulace - DT), minimalizováním maximálního úhlu (min-max triangulace), apod. Kritéria zohledňující délku hran se zaměřují na minimalizování sumy délek hran (triangulace s minimální vahou) i její lokální aproximace, složená z nejkratších možných hran (Greedy triangulace - GT), apod.

2.1.1 Delaunay triangulace - DT

Delaunay triangulace minimalizuje maximální úhel v každém trojúhelníku. Patří mezi upřednostňované a v praxi nejčastěji používané. Vytváří tzv. „dobré“ trojúhelníky, což znamená blízké rovnostranným. O takových trojúhelnících pak lze konstatovat, že by měly co nejlépe lokálně reprezentovat hodnotu povrchu.

DT je taková triangulace množiny bodů, kde se v kružnici opsané každému jejímu trojúhelníku nevyskytuje žádný vrchol jiného trojúhelníku z této množiny. [7]. Definici doplňuje obr. 2.2.



Obrázek 2.2: Kružnice opsaná trojúhelníku v DT neobsahuje další vrholy trojúhelníků z téže množiny.

DT je globálně i lokálně optimální vůči kritériu minimálního úhlu a hranice tvoří konvexní obálku [10]. Pozitivní je i skutečnost, že výpočetní složitost DT algoritmů dosahuje $O(N \log N)$ v nejhorším případě a složitosti blízké nebo totožné $O(N)$ dosahuje v případech očekávaných.

2.1.2 Lokálně minimální triangulace - LMT

Dle definice je triangulace lokálně minimální, pokud obsahuje jen lokálně minimální hrany.

Hrana e je lokálně minimální, když platí alespoň jedno z tvrzení [4]:

- Hrana e leží na konvexní obálce.

- Hrana e je přilehlá ke dvěma trojúhelníkům, které tvoří nekonvexní čtyřúhelník.
- Hrana e je přilehlá ke dvěma trojúhelníkům, které tvoří konvexní čtyřúhelník a e je kratší než druhá úhlopříčka čtyřúhelníku

2.2 Vrstevnice

Vrstevnice jsou jedny z nejdůležitějších kartografických nástrojů. S jejich pomocí je možné reprezentovat výšku a sklon terénu do dvou-dimenzionálních (2D) map. [12]

Vrstevnice je lomená čára spojující body o stejné nadmořské výšce. U trojúhelníkové sítě tím rozumíme z souřadnice bodů. Samotný výpočet vrstevnic na trojúhelníkové síti nejčastěji probíhá vypočtením průsečíku triangulace s výškovým rozsahem $\langle z_{min}; z_{max} \rangle$, na kterém jsou vrstevnice počítány [12].

2.2.1 Artefakty

Automatický výpočet vrstevnic je nedílnou součástí GIS programů. Takto vypočtené vrstevnice však obsahují artefakty - tedy místa, které by zkušený kartograf nakreslil rozdílne. Manuální oprava je pro experty poměrně snadná, ale samozřejmě to stojí nějaký čas. [12]

Vrstevnice mohou být chybné zejména kvůli následujícím faktorům [7]:

- Špatná vstupní data
- Nepřesné numerické výpočty
- Nesprávná interpolace
- Konvexní obálka na hranicích sítě
- Lokálně nebo globálně nevhodná triangulace

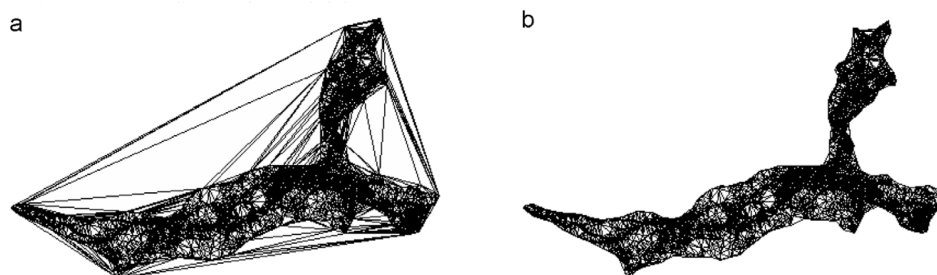
Špatná vstupní data: vstupní data způsobují problémy, pokud jsou extrémně nerovnoměrná nebo podvzorkovaná (ve srovnání s očekávanou kvali-

tu výstupu). Problematická vstupní data vznikají například při transformaci vrstevnic na množinu bodů.

Nepřesné numerické výpočty: Matematické vzorce a algoritmy jsou sice odvozeny s nekonečnou přesností, reálné výpočty jsou však limitovány přesností reprezentace čísel v počítači. To přináší velké problémy zejména v geometrických výpočtech, například při testování polohy bodu vůči přímce či kružnice, což jsou klíčové kroky v triangulačních algoritmech.

Nesprávná interpolace: I když jsou vypočítané vrstevnice vyhovující, mohou být následně zkresleny vyhlazováním. Vyhlazené vrstevnice mohou protínat jedna druhou. Tato chyba nastává, pokud jsou délky segmentů vrstevnic „příliš různé“ a příliš se sobě přibližují.

Konvexní obálka na hranicích sítě: Většina triangulačních metod je definována na konvexní obálce vstupních bodů. Pokud je soubor bodů nekonvexní, vzniknou místa, kde nejsou žádné vstupní body, viz obr. 2.3. Takové trojúhelníky jsou obvykle úzké, a tedy zdrojem problémů pro výpočet vrstevnic.

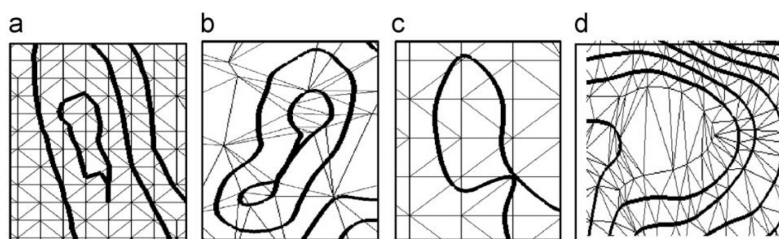


Obrázek 2.3: Triangulace na konvexní obálce (a). Triangulace stejné oblasti s nekonvexní polygoniální hranicí (b) [7].

Lokálně nebo globálně nevhodná triangulace: Globálně nevhodná triangulace je taková triangulace, která neoptimalizuje tradiční kritéria, jako například úhly (neměly by být moc velké ani malé) nebo délku hran (raději kratší hrany).

Ani dobrá volba triangulační metody nezaručí kvalitní vrstevnice pro každý terén, stále se mohou objevit nejrůznější druhy artefaktů. Typické chyby na vrstevnicích jsou znázorněny na obrázcích 2.4 a 2.5:

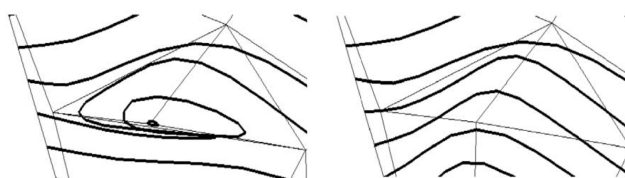
- Obr. 2.4a ukazuje, kdy vrstevnice svírají příliš malý úhel. Zde vrstevnice



Obrázek 2.4: Typické chyby na vrstevnicích [12].

leží na hraně trojúhelníka a vrací se zpět po té samé hraně.

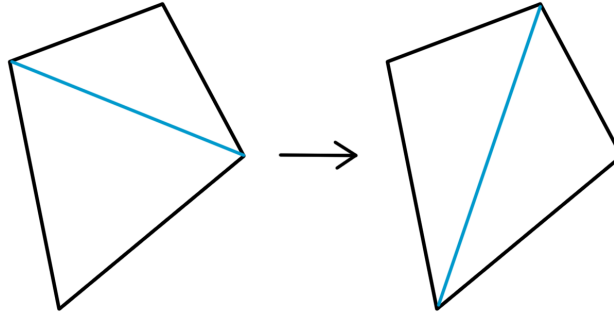
- Obr. 2.4b zobrazuje, když vrstevnice v některých oblastech splývá. Artefakt vzniká např. v situacích, kdy vrcholy dvou kopců splynou v jednu souřadnici.
- Obr. 2.4c znázorňuje, kdy se vrstevnice samy sobě příliš přibližují. Takové vrstevnice mohou sice matematicky odpovídat, ale kartograf by je považoval za nevyhovující. Tato chyba může rovněž vzniknout vyhlazením úseček vrstevnic na křivky, což je rovněž nepřijatelné.
- Obr. 2.4d ukazuje, kdy vrstevnice neodpovídá tvaru terénu kvůli rovinným trojúhelníkům. Takový trojúhelník má všechny své tři vrcholy se stejnou výškou. Zpravidla reprezentují plochý povrch (např. jezero).



Obrázek 2.5: Špatný tvar vrstevnice (vlevo), oproti lepšímu výsledku (vpravo) [12].

2.2.2 Lokální prohazování hran

Jednou z možností, jak modifikovat již triangularizovanou síť za účelem změny tvaru vrstevnic, je lokální prohazování hran v konvexním čtyřúhelníku. Tento čtyřúhelník je tvořen dvěma sousedními trojúhelníky. Na obr. 2.6 je znázorněno, jak takové prohození hran vypadá.



Obrázek 2.6: Prohazování hran v konvexním čtyřúhelníku.

Pokud by zvolený čtyřúhelník nebyl konvexní, prohazování hran by narušilo definici triangulizované sítě - prohazováním hran by vznikly překřížené hrany v síti, což není žádoucí.

Cílem lokálního prohazování je dosáhnout triangulace s lokálním extrémem zvoleného kritéria. Pokud by prohozením došlo k nějakému zlepšení, prohazují se hrany tak dlouho, dokud ke zlepšení dochází.

Jelikož se vždy rozhoduje mezi dvojicí trojúhelníků, nelze tuto metodu aplikovat na globální kritéria. Rovněž nelze aplikovat kritéria, která uvažují větší oblast než je čtyřúhelník. Naopak velkou výhodou lokálního prohazování hran je jeho rychlost, jednoduchost a nižší výpočetní složitost, než je tomu u simulovaného žíhání.

Simulované žíhání [Simulated Annealing] [8] je pravděpodobnostní optimalizační metoda využívaná při řešení obtížných kombinatoriálních úloh, NP-úplných problémů, a v dalších oblastech, kdy je schopno nalézt optimální řešení nebo blížící se optimu. Využívá se tedy i při optimalizaci trojúhelníkové sítě, do které se provádějí zásahy. Zda bude nový stav sítě akceptován do dalších výpočtů, určí pravděpodobnostní algoritmus. Se simulovaným žíháním je tedy možné aplikovat globální i složitější kritéria. Jeho výsledky jsou nejbližší globálnímu optimu. Nevýhodou však je vysoká výpočetní složitost a nedeterminističnost.

Tato práce studuje, zda je možné optimalizovat síť na základě lokálního prohazování a současně aplikací některých z kritérií pro hodnocení kvality vrstevnic.

2.3 Kritéria hodnocení kvality

Kritérií pro hodnocení kvality vrstevnic je celá řada. Pro každý artefakt na obr. 2.4 se hodí jiné kritérium.

Dále je komplikované aplikovat kritéria na již vyhlazené vrstevnice, proto je mnohem snazší a přínosnější aplikovat je na nevyhlazené, což respektuje i má implementace řešení.

Kritéria lze rozdělit na ty, které hodnotí pouze jednu vrstevnici, a na ty, které hodnotí více vrstevnic najednou. Dále jsou kritéria zabývající se délkami jednotlivých úsečků vrstevnic, velikosti úhlů, oscilací, apod. P. Weisheitel ve své bakalářské práci [1] popsal několik kritérií, která studoval pro účely své práce. K závěrečnému ohodnocení vybral kritéria popsaná v tabulce 2.1.

Kritérium	Popis
Úhlové	Detekuje ostré úhly na vrstevnici. Hledá artefakty, kde směrové vektory úseček svírají příliš ostrý úhel.
LLR (Local Length Ratio)	Zaznamenává kritické body v místech s maximální změnou křivosti.
Poměr délek	Zaměřuje se na nerovnoměrné délky úsečků vrstevnic.
Znaménkové	Ideální vrstevnice by neměla příliš často měnit směr a oscilovat, kritérium penalizuje všechny tyto detekované změny.

Tabulka 2.1: Kritéria k experimentům.

3 Navrhované řešení

V této kapitole si nejprve představíme předběžné experimenty a poté hlavní myšlenku vlastního návrhu řešení, která z předběžných experimentů vyplývá. Dále je představena samotná aplikace a část kapitoly je rovněž věnována detailnímu probrání jednotlivých částí, od způsobu procházení sítě, přes použité algoritmy, až po aplikaci zvolených kritérií.

Postup u předběžných experimentů: Nejprve byl vybrán soubor s daty představujícími terén. Data byla použita jak umělá, tak reálná. Tato data byla za pomoci triangulačního software triangularizována. Programem pro výpočet vrstevnic se na triangularizovaných datech vypočítaly vrstevnice. Na závěr prošly tyto vrstevnice poslední aplikací, která ohodnotila jejich kvalitu. K dispozici jsem měla uvedený software:

1. Triangulační programy DT.exe a LT.exe prof. Kolingerové pro výpočet Delaunay a lokálně minimální triangulace
2. Program pro výpočet a vizualizaci vrstevnic p. Strycha [11]
3. Program pro hodnocení kvality vrstevnic p. Weisheitela [1]

Vypočtené vrstevnice jsou ohodnoceny jako kvalitní či nekvalitní dle předurčených kritérií (tabulka 2.1). Pro každé byla vypočtena kvalita vrstevnic a tato kvalita byla zahrnuta v celkovém hodnocení, které bylo vypočítáno dle vzorce (čím vyšší hodnota kvality v %, tím vyšší kvalita vrstevnic):

$$\text{Výsledna kvalita [\%]} = 100 - \frac{\text{počet odhalených vad}}{\text{počet všech možných vad}} * 100 \quad (3.1)$$

Výsledky z předběžných experimentů jsou popsány v kapitole 4. Na jejich základě byl vybrán typ triangulace a implementovaná kritéria pro dále popsané vlastní řešení.

3.1 Vlastní návrh řešení

Hlavní myšlenka celé práce spočívá v lokálním prohazování hran dvojic sousedních trojúhelníků. Na každé dvojici jsou vypočteny vrstevnice, které trojúhelníky generují. To samé se vypočte pro dvojici trojúhelníků s prohozenou hranou, čímž získáme jiný tvar vrstevnic. Oba tvary jsou porovnány s pomocí zvoleného kritéria, vybraného z předběžných průzkumů. Lepší tvar je vybrán. Takto se postupuje po celé síti, dokud v ní dochází ke změnám.

3.2 Aplikace

Celý program je realizován v programovacím jazyce ANSI C. Jazyk byl zvolen především pro jeho rychlost. Aplikace má za cíl doplnit programové vybavení poskytnuté vedoucí práce a jelikož jsou v této práci stěžejní výpočty a generování výstupního souboru s triangularizovanou sítí a nikoliv vizualizace, komunikuje program s uživatelem přes příkazový řádek.

3.2.1 Zdrojové soubory

main.c

Hlavní zdrojový soubor načítá soubor s daty představující triangularizovanou síť. Načte si údaje o trojúhelnících, souřadnice jednotlivých bodů a informace o sousedech trojúhelníků. Dále je v tomto zdrojovém souboru důležitá smyčka, která má za úkol procházet celou sítí trojúhelníků, dokud v ní dochází ke změnám. Ještě než předá dvojici trojúhelníků dále pro výpočet vrstevnic a aplikaci kritéria, ověří, zda je vzniklý čtyřúhelník konvexní dle algoritmu popsáném v 3.4.1. K tomuto zdrojovému souboru přísluší hlavičkový soubor *main.h* obsahující deklarace funkcí, struktur a důležité konstanty.

contour_lines.c

Tato zdrojová část aplikace má za úkol zkontrolovat, zda konkrétní trojúhelník generuje vrstevnici při dané výšce, a pokud ano, vypočítá její úsečku - tento výpočet probíhá podle rovnic uvedených v 3.4.2. Poté vrstevnice předá dále pro aplikaci některého z kritérií. Příslušný hlavičkový soubor *contour_lines.h* obsahuje kromě deklarací funkcí například důležitou strukturu

pro uchovávání vrstevnic dvojice trojúhelníků.

criteria.s.c

Všechna aplikovaná kritéria a jejich hodnocení použitá na vypočtené vrstevnice jsou v tomto zdrojovém souboru. Příslušný hlavičkový soubor *criteria.h* uchovává deklarace funkcí aplikujících kritéria na dané vrstevnice.

3.2.2 Důležité datové struktury

Struktura Triangle

Uchovává indexy do pole se souřadnicemi bodů. Protože trojúhelník je tvořen třemi vrcholy, obsahuje tato struktura tři indexy. Dále obsahuje informaci o všech susedech aktuálního trojúhelníka. Při lokálním prohazování je třeba upravit indexy vrcholů nově vzniklého trojúhelníka. Informace o susedech se rovněž mění. Pokud trojúhelník některého ze susedů nemá (čili leží na hranici), je do proměnné uložena hodnota -1 .

Struktura Vertex

Indexy vrcholů trojúhelníka odkazují právě do této struktury. Jsou zde uloženy proměnné typu *double*, které uchovávají všechny tři souřadnice x, y, z daného bodu, neboli vrcholu trojúhelníka.

Struktura Ratios

Struktura uchovávající vypočítané poměry délek u jednotlivých úseček vrstevnice. Rovněž uchovává výšku, pro kterou byl poměr vypočítán, aby bylo možné poměry mezi sebou porovnat.

3.3 Průchod sítí

Jak již bylo zmíněno, sítí se prochází tolikrát, kolikrát dochází ke změnám. Zestručněný pseudokód smyčky v programu by mohl vypadat následovně:

```

Data: triangularizovaná síť
Result: síť s prohozenými hranami respektující dané kritérium
while hotovo == FALSE do
    hotovo = TRUE;
    for i := 0 → pocet_trojuhelniku do
        for j := 0 → sousedni_trojuhelnika do
            if prohod(n, trojuhelnik) == TRUE then
                hotovo = FALSE;
            else
                pokračuj;
            end
        end
    end
end

```

Algorithm 1: Hlavní smyčka programu - průchod sítí.

3.4 Použité algoritmy

V této sekci jsou uvedeny důležité algoritmy, které byly využity při vypracování práce.

3.4.1 Test konvexity

Algoritmus pro test konvexity [3] rozpozná, zda jsou vrcholy polygonu řazeny po směru nebo proti směru hodinových ručiček. V programu je algoritmus využit pro zjištění, zda je námi zvolený čtyřúhelník konkávní nebo konvexní. Pokud je konvexní, všechna znaménka výsledků testu budou shodná. V případě konkávního polygonu budou znaménka různá, viz obr. 3.1. Pro polygon také platí, že žádné dva vrcholy nesmějí být shodné a následující hrany být rovnoběžné.

Polygonem rozumějme mnohoúhelník o N vrcholech:

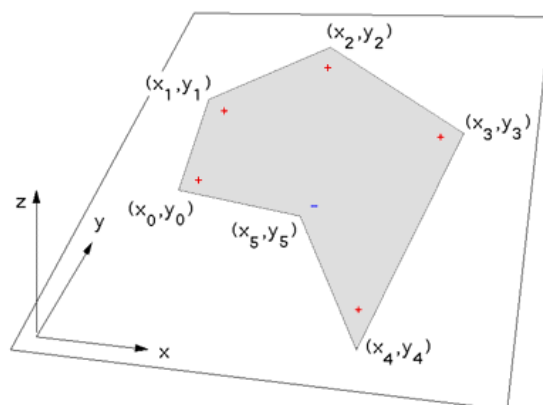
$$(x_0, y_0), (x_1, y_1) \dots (x_{n-1}, y_{n-1}) \quad (3.2)$$

Nejprve je třeba spočítat vektorový součin směrových vektorů dvou sousedních hran:

$$z = ((x_i - x_{i-1}), (y_i - y_{i-1})) \times ((x_{i+1} - x_i), (y_{i+1} - y_i)) \quad (3.3)$$

$$z = (x_i - x_{i-1}) * (y_{i+1} - y_i) - (y_i - y_{i-1}) * (x_{i+1} - x_i) \quad (3.4)$$

Pokud $z < 0$, výsledek má záporné znaménko a naopak. Výsledek $z = 0$ není možný vzhledem k použité definici polygonů. Pokud jsou pro všechny hrany v polygonu znaménka shodná, je polygon konvexní.



Obrázek 3.1: Konkávní polygon [3].

3.4.2 Test průsečíku úseček

Vrstevnici si lze představit jako rovinu o určité výšce, která protíná náš konkrétní trojúhelník. Pokud jej neprotne, trojúhelník tuto vrstevnici negeneruje. Pokud ano, vrstevnice bude tvořit úsečku, jejíž průsečíky s hranami trojúhelníka vytvoří její krajní body (kromě speciálního případu, kdy by vrstevnice procházela vrcholem trojúhelníka).

Průsečík úsečky vrstevnice $V(x_v, y_v, z_v)$ a hrany trojúhelníka s krajními body $P_0(x_0, y_0, z_0)$ a $P_1(x_1, y_1, z_1)$ vypočítáme podle následujících rovnic[9]:

$$x_v = x_0 + t(x_1 - x_0) \quad (3.5)$$

$$y_v = y_0 + t(y_1 - y_0) \quad (3.6)$$

$$z_v = z_0 + t(z_1 - z_0) \quad (3.7)$$

Protože počítáme s vrstevnicemi o různých výškách v , jsou nám tyto výšky známe.

$$z_v = v \quad (3.8)$$

Do třetí rovnice (3.7) dosadíme námi zvolenou výšku vrstevnice a získáme tak parametr t . Pokud bychom dostali $t = 0$, hledaný průsečík by ležel v bodě P_0 . Pokud $t = 1$, průsečík by ležel v bodě P_1 . Pokud $t \in (0, 1)$, leží hledaný průsečík uvnitř hrany trojúhelníka. Dosazením hodnoty t do rovnic (3.5 a 3.6) získáme souřadnice hledaného průsečíku. Pokud by vyšla jiná hodnota t než z tohoto intervalu, průsečík na naší úsečce neleží - tedy hranu trojúhelníka neprotíná. V případě, že by rovnice (3.7) nabyla tvaru $z_v = konst$, nebylo by možné dopočítat parametr t a rovnice v tomto případě nevyužijeme.

3.5 Kritéria pro triangularizovanou síť

Pro účely srovnání a ladění bylo implementováno jednoduché kritérium hledající kratší diagonálu ve zvoleném konvexním čtyřúhelníku (viz obr. 2.6). Kritérium se zabývá jen triangularizovanou sítí.

Mějme dva body se souřadnicemi (x_0, y_0) , (x_1, y_1) . Délku úsečky mezi nimi vypočteme pomocí vztahu Euklidovské vzdálenosti D_E :

$$D_E = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2} \quad (3.9)$$

Po získání délek obou diagonál je vybrána kratší z nich.

3.6 Kritéria pro hodnocení kvality vrstevnic

Na základě předběžných experimentů a na základě průzkumu v bakalářské práci p. Weisheitla, jsem se rozhodla pro implementaci následujících kritérií do své aplikace:

3.6.1 Kritérium poměru délek na jedné vrstevnici

Toto kritérium vychází z tvrzení, že délky úseček na jedné vrstevnici by měly být ideálně stejně dlouhé, viz obr. 3.2. Pro daný trojúhelník a jeho souseda se vypočítají vrstevnice. Pro každou vrstevnici při určité výšce se zjistí maximální délka úsečky. Touto úsečkou je vydělena kratší úsečka a získaný poměr je uložen do pole poměrů *pole_pomeru*[] spolu s výškou vrstevnice trojúhelníka v_t nebo souseda v_s , kdy $v_t = v_s$. Zjednodušený pseudokód první části výpočtu by mohl vypadat následovně:

```

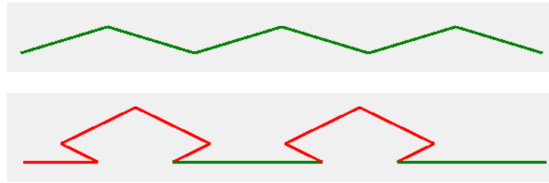
Data: pocet := 0,
Result: pole s poměry délek příslušných vrstevnic
for  $i := 0 \rightarrow \text{vrstevnice\_trojuhelnika}$  do
  for  $j := 0 \rightarrow \text{vrstevnice\_souseda}$  do
    if  $v_t == v_s$  then
       $l_1 := \text{spocti\_delku}(\text{vrstevnice\_trojuhelnika});$ 
       $l_2 := \text{spocti\_delku}(\text{vrstevnice\_souseda});$ 
      if  $l_1 > l_2$  then
         $\text{pomer} := l_2/l_1;$ 
      else if  $l_2 > l_1$  then
         $\text{pomer} := l_1/l_2;$ 
      else
         $\text{pomer} := 1;$ 
      end
       $\text{pole\_pomeru}[\text{pocet}].\text{vyska} := v_t;$ 
       $\text{pole\_pomeru}[\text{pocet}].\text{pomer} := \text{pomer};$ 
      pocet++;
    end
  end
end

```

Algorithm 2: Výpočet poměrů délek úseček vrstevnic.

Výstupem pseudokódu je *pole_pomeru*[], které je naplněno poměry délek úseček vrstevnic. Totéž se musí vypočítat i po prohození hrany mezi oběma sousedními trojúhelníky a získáme tak dvě pole poměrů - každé pro jednu kombinaci. Pole se projdou a porovnávají se vždy poměry pro stejnou výšku v_t (pokud existují). Vyšší poměr vítězí, jelikož si byly dané úsečky více podobné délkou. Následně inkrementujeme proměnnou reprezentující skóre dané kombinace trojúhelníků. Kombinace s vyšším skóre se použije.

Pro toto kritérium je samozřejmě důležitý výpočet délky úseček vrstevnic,



Obrázek 3.2: Vyhovující (zelené) a nevyhovující (červené) délky úseček vrstevnic dle kritéria poměru délek.

neboli vzdálenost mezi průsečíky vrstevnic s hranami trojúhelníka. Vztah pro vzdálenost d dvou bodů $P_0[x_0, y_0, z_0]$ a $P_1[x_1, y_1, z_1]$ v prostoru je následující:

$$d = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2} \quad (3.10)$$

Protože vždy počítáme vzdálenosti při stejných výškách, vyjde nám pro každé $z_1 - z_0 = 0$ a lze tedy použít vzorec (3.9).

3.6.2 Poměr délek vrstevnic v množině

Toto kritérium je modifikací předchozího. Bylo implementováno z toho důvodu, že by mohlo poskytnout jemnější vyhodnocení oproti předešlému, jelikož mezi sebou porovnává celou množinu úseček vrstevnic a nikoliv jen ty při stejné výšce.

V této práci rozumějme množinu jako všechny vrstevnice vygenerované na dvojici trojúhelníků. Délky se uloží do pole, následně se z pole vyhledá maximální délka úsečky a tou se vydělí ostatní úsečky v množině. Pro každou nám tedy vyjde nějaká hodnota z intervalu $< 0, 1 >$. Pro danou množinu se vypočítá suma poměrů a totéž se provede i po prohození hrany. Obě sumy se porovnají a kombinace s větší sumou se zvolí jako finální.

Aby suma nebyla zavádějící, načítám do ní hodnoty jen v případě, že vrstevnice jsou generovány při stejné výšce u obou kombinací. Nestane se tedy, že by jedna kombinace byla zvýhodněna jen tím, že generuje nějakou vrstevnici navíc.

3.6.3 Úhlové kritérium

Ačkoliv v předběžných experimentech (4.1) dosahovala kvalita úhlového kritéria poměrně vysokých hodnot (nad 90%) a mohlo by se zdát, že již není „co vylepšovat,“ rozhodla jsem se jej i přesto implementovat. Vysoká kvalita může totiž svědčit o tom, že kritérium nebylo vůbec schopné úhly detekovat, a proto je výsledek zkreslený. Protože však mé řešení počítá vrstevnice na **nevyhlazených** úsečkách vrstevnic, mohlo by kritérium fungovat lépe. Dalším důvodem k implementaci je, že na dostupných testovacích datech jsou vizuálně zřejmé příliš ostré a nevzhledné úhly 3.3, s čímž by úhlové kritérium rovněž mohlo pomoci.



Obrázek 3.3: Červenými kroužky jsou označeny nevyhovující úhly na vrstevnici.

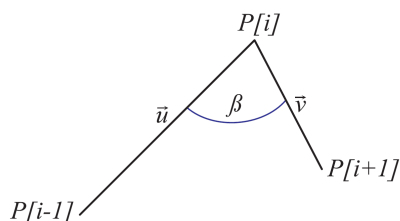
Dle úvahy p. Weisheitela a jeho implementaci kritéria poměru úhlů v tabulce 2.1 jsem do své práce implementovala jeho modifikaci. Původně by kritérium mělo význam při porovnávání úhlů jen na jedné vrstevnici. Protože se tato práce zaměřuje na lokální prohazování trojúhelníků a program neprochází každou vrstevnicí po celé délce zvláště, je nutné kritérium modifikovat.

Pokud tedy dvojice trojúhelníků generuje nějakou vrstevnici při dané výšce, spočte se úhel, který mezi sebou svírají její následující úsečky dle vztahu:

$$\cos \beta = \frac{\vec{u} * \vec{v}}{|\vec{u}| * |\vec{v}|} = \frac{u_1 v_1 + u_2 v_2}{\sqrt{u_1^2 + u_2^2} * \sqrt{v_1^2 + v_2^2}} \quad (3.11)$$

,kde \vec{u} , \vec{v} jsou směrové vektory dvou následujících úseček a β je hledaný úhel, viz obr. 3.4

Dle p. Weisheitela jsem se držela rozmezí pro velikost úhlu. Jako kvalitní



Obrázek 3.4: Úhel mezi dvěma úsečkami [1].

zvolil úhel v rozmezí mezi $\langle 120, 180 \rangle$. Pro svoji implementaci jsem jako vítěznou kombinaci trojúhelníků zvolila tu, jejíž úhel se jednak vešel do tohoto intervalu, a jednak byl z těch dvou „otevřenější.“

Další kritéria již do mého řešení nebyla implementována. Konkrétně z tabulky 2.1 jsem vynechala LLR a znaménkové kritérium. LLR kritérium, stejně jako úhlové, detekuje ostré úhly na vrstevnici. V předběžných experimentech jsem zjistila, že nepřináší žádné nové ani zajímavé výsledky. Naopak výsledná kvalita vrstevnic byla vždy téměř shodná u obou kritérií. Dále jsem vynechala znaménkové kritérium, které sice přineslo zajímavé výsledky, nicméně detekuje oscilace po celé délce vrstevnice a tím pádem se stává nepoužitelné pro lokální prohazování hran sousedních trojúhelníků.

4 Experimenty a výsledky

V této kapitole nejprve budou představeny předběžné experimenty, provedené na poskytnutém programovém vybavení, a dále experimenty s vlastním programovým řešením.

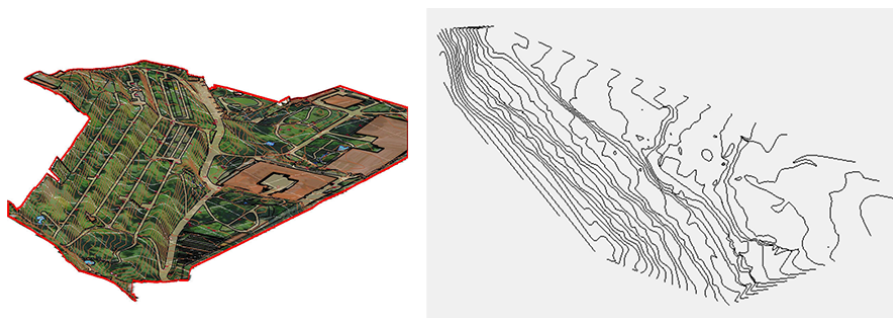
4.1 Předběžné experimenty

Na základě programového vybavení, které mi spolu s testovacími daty poskytla vedoucí práce, jsem otestovala na různých datech Delaunay a lokálně minimální triangulace. Dále jsem zkoumala, jak na těchto sítích vypadají vykreslené vrstevnice. Tyto vrstevnice na závěr ještě prošly ohodnocovacím programem, jehož výstup je uveden v příslušných tabulkách.

Data byla pro testovací účely poskytnuta Ing. Tomášem Bayerem, Ph.D. z UK Praha, doc. Ing. Václavem Čadou, CSc. ze ZČU Plzeň a vedoucí práce.

Experiment - model terénu botanické zahrady

První vybraný experiment byl proveden na reálných datech, konkrétně botanické zahrady v Troji v Praze - viz obr. 4.1. Ačkoliv se jedná o skutečná data, jsou zajímavá v mnoha ohledech. Díky schodovitému terénu se zde obtížně počítají kvalitní vrstevnice.



Obrázek 4.1: Botanická zahrada v Troji, digitální model terénu [6] (vlevo), vykreslené vrstevnice (vpravo).

Použité kritérium	DT [%]	LT [%]
úhlové	98,955	98,594
LLR	98,849	98,573
poměr délek	36,727	28,618
znaménkové	77,727	77,786
celkově	78,065	75,868

Tabulka 4.1: Experiment - botanická zahrada, výsledná kvalita vrstevnic spočtených na Delaunay a lokálně minimální triangulaci.

Experiment pro botanickou zahradu proběhl dle kritérií kvality lépe pro Delaunay triangulaci, a to celkem o 2,197%. Největší úspěch mělo přitom kritérium poměru délek, které výrazněji zapříčinilo náskok Delaunay triangulace.

Experiment - umělá problematická data

Tento experiment byl proveden na umělých datech. Na obr. 4.2 vizualizující data jsou velmi zřetelné prudké výkyvy nadmořských výšek, což z nich činí data zajímavá a problematická. Výsledky experimentů zobrazuje tabulka 4.2.



Obrázek 4.2: Ukázka umělých dat, 3D vizualizace (vlevo), vykreslené vrstevnice (vpravo).

Kritérium	DT [%]	LT [%]
úhlové	99,73	99,676
LLR	99,73	99,676
poměr délek	52,83	63,26
znaménkové	84,072	81,595
celkově	84,091	86,052

Tabulka 4.2: Experiment - umělá data, výsledná kvalita vrstevnic spočtených na Delaunay a lokálně minimální triangulaci.

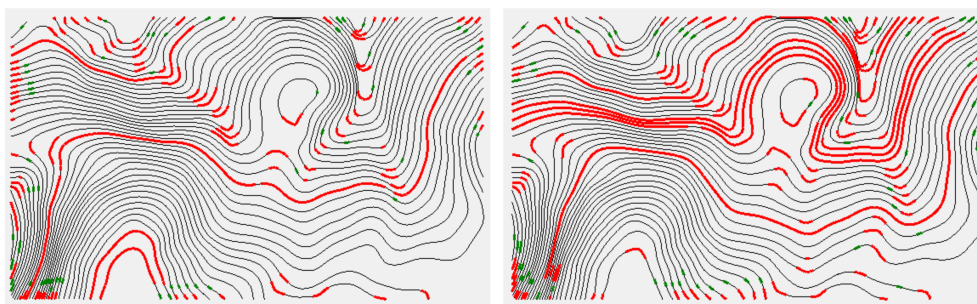
Z výsledků lze vyčíst, že při celkovém hodnocení se u takovýchto netriviálních dat projevila jako kvalitnější LT - triangulace. Stalo se tak z jediného důvodu, zvítězila totiž v kritériu poměru délek o $10,43\%$, čímž enormně zlepšila svůj celkový výsledek.

Experiment - model terénu Šumava

Další pozorování bylo provedeno opět na reálných datech představujících povrch Šumavy. Tabulka 4.3 ukazuje výsledky.

Kritérium	DT [%]	LT [%]
úhlové	100	100
LLR	100	100
poměr délek	84,978	72,727
znaménkové	86,472	85,877
celkově	92,862	89,651

Tabulka 4.3: Experiment - model terénu Šumava, výsledná kvalita vrstevnic spočtených na Delaunay a lokálně minimální triangulaci.

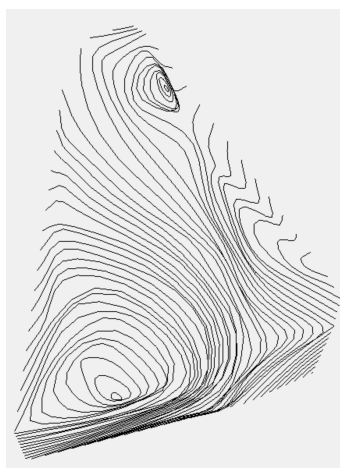


Obrázek 4.3: Kritérium poměru délek, DT - triangulace (vlevo), LT triangulace (vpravo). Červeně jsou vyznačeny nevyhovující hrany.

Výsledky jsou zajímavé zejména kvůli kritériu poměru délek, kde narozdíl od předchozího experimentu s problematickými daty zvítězila DT triangulace. Kritérium poměru délek na vypočtené vrstevnice pohoří Šumavy je vizualizováno na obr. 4.3. Červeně jsou vyznačeny nevyhovující hrany. Dle dalších kritérií jsou výsledky celkem vyrovnané. Pozitivní je výsledná kvalita dle kritérií sledující úhly.

Experiment - model terénu Nečtiny

Výsledky experimentu reálných dat (obr. 4.4) terénu v Nečtinách zobrazuje tabulka 4.4.



Obrázek 4.4: Zobrazení vrstevnic modelu terénu Nečtiny (DT - triangulace).

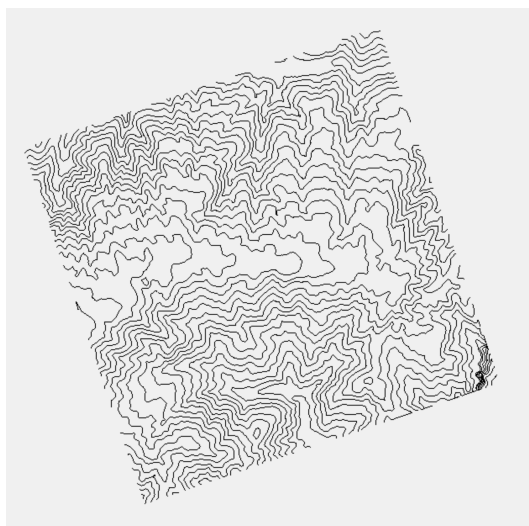
Kritérium	DT [%]	LT [%]
úhlové	97,739	97,246
LLR	97,533	97,14
poměr délek	45,231	45,547
znaménkové	85,618	82,867
celkově	81,53	80,7

Tabulka 4.4: Experiment - Nečtiny, výsledná kvalita vrstevnic spočtených na Delaunay a lokálně minimální triangulaci.

Tentokrát ve výsledcích nemáme tak zřetelný rozdíl v kvalitě vrstevnic dle kritéria poměru délek, avšak kvalita kolem 45% nepůsobí příliš pozitivně. O něco horší se ukázala LT - triangulace (o 2,75%) v detekci oscilací dle znaménkového kritéria. Navzdory mizernému výsledku u kritéria poměru délek však celkové hodnocení dopadlo poměrně dobře a vyrovnaně.

Experiment - Hory

Experiment Hory byl vybrán pro svůj zajímavý vzhled vrstevnic (viz obr. 4.5), výsledky naleznete v tabulce 4.5.



Obrázek 4.5: Vrstevnice Hory (DT - triangulace).

Kritérium	DT [%]	LT [%]
úhlové	99,952	99,608
LLR	99,9523	99,59
poměr délek	72,194	54,913
znaménkové	85,048	78,64
celkově	89,287	83,188

Tabulka 4.5: Experiment - Hory, výsledná kvalita vrstevnic spočtených na Delaunay a lokálně minimální triangulaci.

V celkovém hodnocení zvítězila Delaunay triangulace o 6,1%, vedla si totiž mnohem lépe v kritériích poměru délek (o 17,3%) a znaménkovém kritériu (o 6,4%). Tento rozdíl je velmi markantní.

Zhodnocení předběžných experimentů: Experimenty byly prováděny na rozmanitých reálných i umělých datech. Zajímavé a rovněž markantní rozdíly byly zaznamenány aplikací hodnocení kvality, konkrétně u poměru délek a znaménkového kritéria. Z toho lze usoudit, že s délkou hran a oscilací mívají vrstevnice problémy, které jsou rovněž snadno detekovatelné. Oproti tomu kritéria sledující úhly a vrcholy dopadla vždy velmi pozitivně, nepodařilo se nalézt takový soubor dat, kde by úhlové kritérium ohodnotilo vrstevnice pod 90%. Lepších výsledků rovněž dosáhla Delaunay triangulace a byla proto zahrnuta do vlastního řešení.

4.2 Experimenty s vlastním řešením

S ohledem na výsledky z předběžných experimentů jsem se přiklonila k Delaunay triangulaci. Zajímavá kritéria hodnocení kvality jsem implementovala do svého programu. Experimenty s vlastním řešením jsou popsány v následujících odstavcích a jsou rozděleny dle použitých kritérií zejména kvůli přehlednosti. Všechna kritéria byla testována na různých datech, ale samozřejmě jsou uvedena jen ta, která měla smysl uveřejnit a o něčem vypovídají.

Pro zajímavost a srovnání je na závěr každého experimentu doplněna tabulka s ohodnocenou kvalitou vrstevnic před a po aplikaci daného kritéria, která je vypočítána dle vzorce 3.1 a opět vypočtená programem p. Weisheitela [1].

Výpočet vrstevnic i s jejich vizualizací byl realizován s pomocí programu p. Strycha [11], zatímco aplikace kritérií na lokální prohazování trojúhelníků byla uskutečněna mým programovým řešením.

4.2.1 Experiment 1: kritérium kratší diagonály

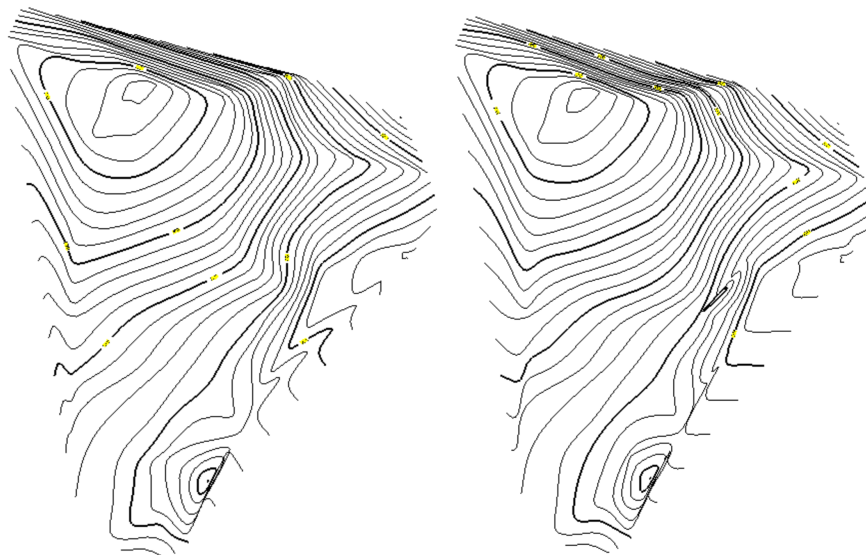
Jako první byly provedeny experimenty s kritériem na kratší diagonálu, které je jednoduché na implementaci a přesto poměrně efektní. Na obrázcích 4.6 a 4.7 je vidět výstup aplikace kritéria na terénní model Nečtiny. Na obrázku 4.8 jsou výstupní data DTuzemi_33.

Tabulka 4.6 popisuje, jak jsou vstupní a výstupní vrstevnice ohodnoceny kvalitou (čím vyšší hodnota, tím kvalitnější vrstevnice). Zatímco výstup experimentu s terénním modelem Nečtiny jsou podle programu více kvalitní (o 0,64%), data DTuzemi_33 se o trochu vyhoršila (o 0,52%).

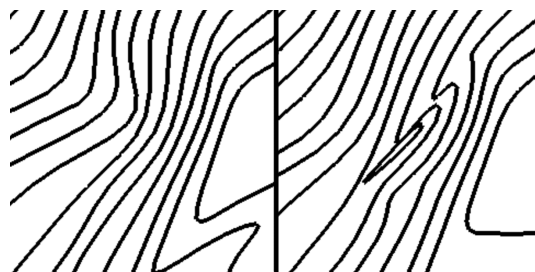
Zhodnocení experimentu: Na obrázku 4.6 jsou zřejmá některá zlepšení i zhoršení na vypočtených vrstevnicích. Dokázalo si poradit s nevzhlednými úhly vrstevnic po stranách, ale na druhou stranu způsobilo nežádoucí zkroucení vrstevnic v jedné části, viz obr. 4.7.

Na datech DTuzemi_33 nenastalo po aplikaci kritéria mnoho změn a proto je zde obrázek s výřezem změněné oblasti. Žádný z obrázků 4.7 není ideální, ale oku příjemnější je pravděpodobně ten druhý (vpravo), kde se díky kritériu vrstevnice trochu „uklidily.“

Vstupní data: terénní model Nečtiny

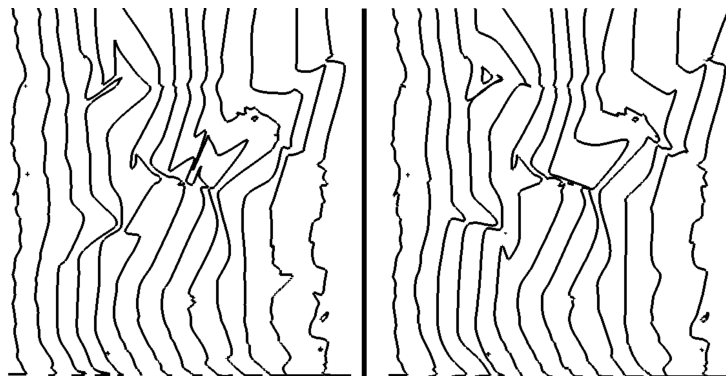


Obrázek 4.6: Vstupní soubor (vlevo), po aplikaci kritéria kratší diagonály (vpravo).



Obrázek 4.7: Vstupní soubor (vlevo), zvětšení problematické oblasti po aplikaci kritéria (vpravo).

Vstupní data: DTuzemi_33



Obrázek 4.8: Vstupní soubor (vlevo), po aplikaci kritéria kratší diagonály (vpravo).

Soubor dat	Kvalita původních dat [%]	Kvalita po aplikaci kritéria [%]	Rozdíl [%]
Nečtiny	81	81,84	0,64
DTuzemi_33	80,32	79,8	0,52

Tabulka 4.6: Výsledky programu hodnotící kvalitu vrstevnic.

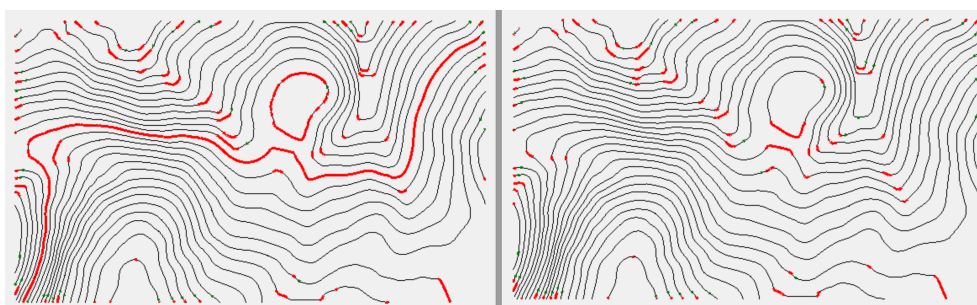
4.2.2 Experiment 2: kritérium poměru délek

Kritérium rozebrané v sekci 3.6.1 bylo aplikováno na data reprezentující terénní model Šumavy a Nečtin.

Zhodnocení experimentu: Na první pohled nebyly rozdíly po aplikaci kritéria na data s modelem Šumavy 4.9 příliš zřejmé a nedošlo k žádné hrubé chybě při výpočtu vrstevnic. Proto byly červeně zvýrazněny délky úseček, které nevyhovovaly kritériu poměru délek v ohodnocujícím programu. Zajímavé je, že u poměrně jednoduchých dat, jako je Šumava, kritérium vrstevnice nepatrně vylepšilo. Dále můžeme vyzorovat, že ačkoliv nyní délky úseček vrstevnic více vyhovují (soudě dle červeně obarvených a tedy nevyhovujících vrstevnic před aplikací kritéria), celková kvalita dat se zhoršila (o 1,52%), viz tabulka 4.7. Ačkoliv bylo tedy jedno kritérium vylepšeno, stalo se tak na úkor ostatních kritérií, se kterými ohodnocující program pracuje.

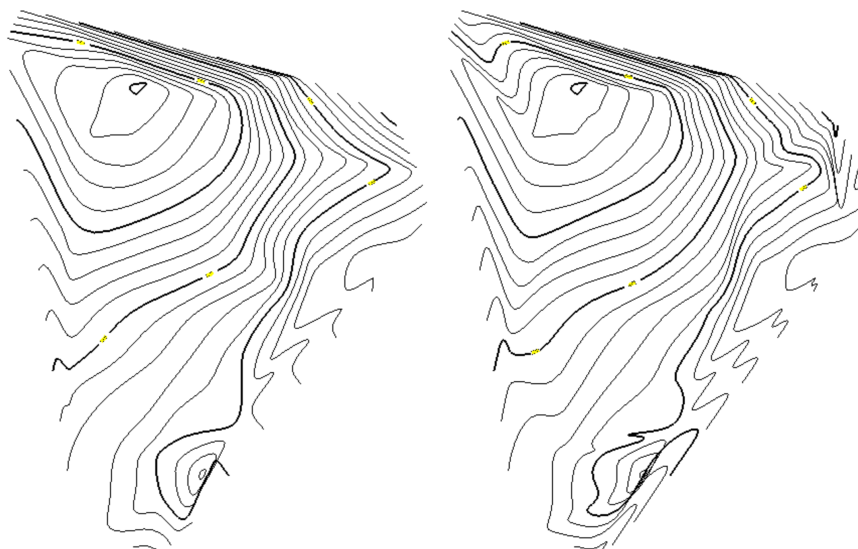
O dost hůře vizuálně i výpočetně dopadl experiment se vstupním souborem Nečtiny. Je zde patrné, že pokud je kritérium aplikováno na netriviální data, neporadí si s kritickými místy jako je na obr. 4.11 a spíše se ještě zhorší (o 3,64%), viz tabulka 4.7.

Vstupní data: terénní model Šumavy

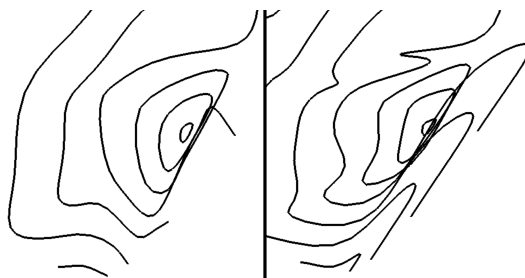


Obrázek 4.9: Vstupní soubor (vlevo). Po aplikaci kritéria poměru délek (vpravo).

Vstupní data: terénní model Nečtiny



Obrázek 4.10: Vstupní soubor (vlevo). Po aplikaci kritéria poměru délek (vpravo).



Obrázek 4.11: Přiblížení problematického místa - původní soubor (vlevo), po aplikaci kritéria poměru délek (vpravo).

Soubor dat	Kvalita původních dat [%]	Kvalita po aplikaci kritéria [%]	Rozdíl [%]
Nečtiny	81	77,36	3,64
Šumava	92,8	94,32	1,52

Tabulka 4.7: Výsledky programu hodnotící kvalitu vrstevnic.

4.2.3 Experiment 3: Kritérium poměru délek na množině

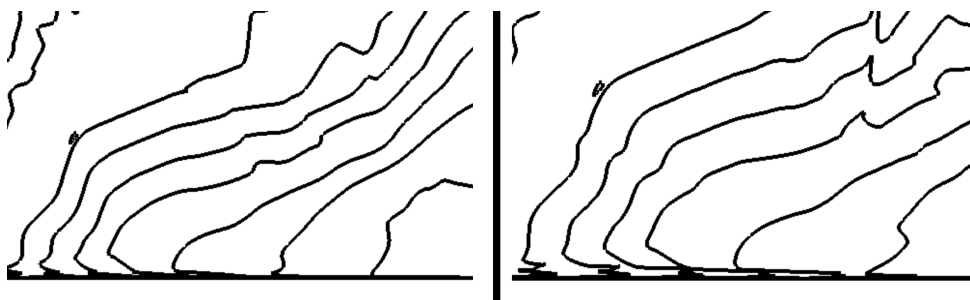
Modifikace předchozího kritéria byla aplikována na data DT_uzemi1 a botanická zahrada. V případě botanické zahrady šlo o zjištění, jaké změny způsobí kritérium na složitých datech.

Zhodnocení experimentu: Kritérium poměru délek na množině vrstevnic aplikované na soubor DT_uzemi1 téměř nic nezměnila kromě jedné kritické oblasti, viz obr. 4.12. Z toho lze usuzovat, že ani toto kritérium si samotné nedovede poradit s komplikací na vrstevnicích.

Dále aplikace kritéria na složitá data terasovité zahrady neměla velký úspěch. Pravděpodobně na takto komplikovaný soubor dat, je toto kritérium stále příliš jednoduché i přesto, že měla modifikace zohledňující množinu vrstevnic přinést lepší výsledky. Na první pohled je na obrázcích 4.13 a 4.15 znát, že na vrstevnicích vzniklo mnoho „zoubků“, které by se zde vyskytovat neměly.

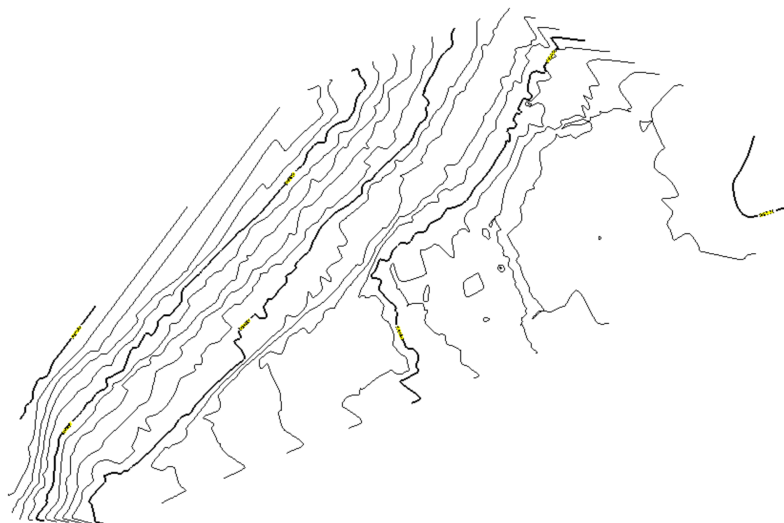
Mírné zhoršení zaznamenal i program hodnotící kvalitu vrstevnic (viz tabulka 4.8).

Vstupní data: DT_uzemi1

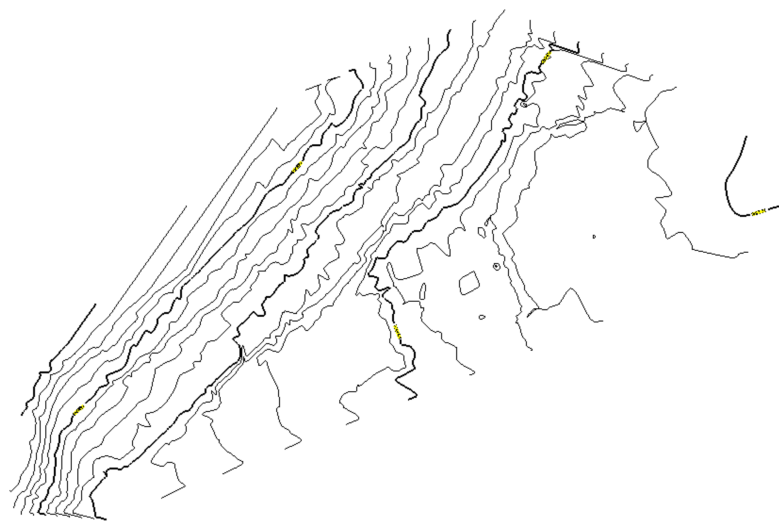


Obrázek 4.12: Oblast vrstevnic před (vlevo) a po aplikaci kritéria poměru délek na množině (vpravo).

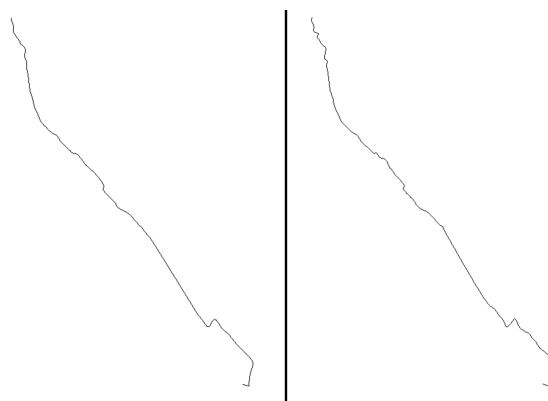
Vstupní data: Botanická zahrada



Obrázek 4.13: Botanická zahrada před aplikací kritéria poměru délek na množině.



Obrázek 4.14: Botanická zahrada po aplikaci kritéria poměru délek na množině.



Obrázek 4.15: Vrstevnice před (vlevo) a po aplikaci kritéria poměru délek na množině (vpravo).

Soubor dat	Kvalita původních dat [%]	Kvalita po aplikaci kritéria [%]	Rozdíl [%]
Botanická zahrada	79,9	78,64	1,26
DT_uzemi	76,88	76,14	0,74

Tabulka 4.8: Výsledky programu hodnotící kvalitu vrstevnic.

4.2.4 Experiment 4: Úhlové kritérium

Úhlové kritérium bylo implementováno z důvodu, že uvažuje kvalitu vrstevnic z jiného pohledu, než ta zohledňující délku úseček.

Zhodnocení experimentu: Kritérium bylo aplikováno na dostupná data, nicméně většinou nebyl patrný rozdíl před a po aplikaci kritéria. Pravděpodobně je kritérium příliš jednoduché a nedokáže způsobit mnoho změn, anebo se nehodí aplikovat na sítě s Delaunay triangulací. Také je možné, že i sebe-menší změny na síti byly skryty následným vyhlazením vrstevnic, což se ale mohlo stát u kteréhokoliv z předchozích kritérií. Na obr. 4.16 je vidět spíše mírné zhoršení vrstevnic na kritické oblasti, se kterou si úhlové kritérium bohužel rovněž neporadilo. Jinak byl výstupní soubor bez výrazných změn.

Vstupní data: terénní model Nečtiny



Obrázek 4.16: Úsek oblasti před (vlevo) a po aplikaci úhlového kritéria (vpravo).

Soubor dat	Kvalita původních dat [%]	Kvalita po aplikaci kritéria [%]	Rozdíl [%]
Nečtiny	81	80,6	0,4

Tabulka 4.9: Výsledky programu hodnotící kvalitu vrstevnic.

5 Závěr

Účelem první části práce bylo provést experimenty testující kvalitu vrstevnic na dvou typech triangulací a ověřující lokální kritéria kvality vrstevnic. V druhé části bylo pak zapotřebí vytvořit program, který podle předpokladu vypočtených vrstevnic a aplikace zvoleného kritéria bude lokálně prohazovat hrany v triangularizované síti tak, aby na dané síti vznikly co nejlepší vrstevnice respektující dané kritérium.

Implementována byla tato kritéria: kratší diagonály, poměr délek jednotlivých vrstevnic, poměr délek na množině vrstevnic a úhlové kritérium vrstevnic. Dle mého názoru se nejvíce osvědčilo kritérium zabývající se poměrem délek vrstevnic při dané výšce.

V této práci jsem se omezila na lokální prohazování hran mezi dvěma sousedními trojúhelníky, což je pravděpodobně příčinou, proč nejsou výsledky více pozitivní. Pro další vývoj by jistě bylo zajímavé vyzkoušet aplikovat kritéria po celé délce vrstevnic, což by přineslo možnosti použití dalších kritérií, které nebylo možné implementovat do této aplikace.

Literatura

- [1] WEISHEITEL, Tomáš. *Aplikace pro hodnocení kvality vrstevnic. Bakalářská práce.* Fakulta aplikovaných věd ZČU, 2014
- [2] LEE, Jay. *Comparison of existing methods for building triangular irregular network models of terrain from grid digital elevation models* International journal of geographical information systems, 1991, s. 267-285.
- [3] BOURKE, Paul. *Clockwise vertex orientation test of a 2D polygon.* The University of Western Australia
- [4] BOSE, Prosenit; DEVROYE, Luc; EVANS, William. *Diamonds are not a minimum weight triangulation's best friend* World Scientific Publishing Company, 1996, s. 68-73.
- [5] WEIBEL, Robert; HELLER, Martin. *Digital terrain modelling* Oxford University Press, 1993
- [6] BAYER, Tomáš. *Digitální model terénu botanické zahrady.* Přírodovědecká fakulta UK v Praze, [online]. [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <https://www.natur.cuni.cz/fakulta/aktuality/soubory-aktualit/digitalni-model-terenu-botanicke-zahrady/view>
- [7] KOLINGEROVÁ, Ivana; DOLÁK, Matyáš; STRYCH, Václav. *Eliminating contour line artefacts by using constrained edges.* Computers Geosciences, 2009, s. 1975-1987.
- [8] KALÁTOVÁ, Eva; DOBIÁŠ, Jaroslav. *Evoluční algoritmy. Diplomová práce.* Fakulta aplikovaných věd, ZČU, [online]. [cit. 2015-03-04]. Dostupné z: http://www.kiv.zcu.cz/studies/predmety/uir/gen_alg2/E_alg.htm

-
- [9] LAVAL, Philippe. *Lines and Planes in 3D*. KSU, [online]. [cit. 2015-03-04]. Dostupné z: http://math.kennesaw.edu/plaval/math2203/linesplanes_wslides.pdf
- [10] SURYNKOVÁ, Petra. *Triangulace. Přednášky*. Karlova univerzita v Praze, [online]. [cit. 2015-01-11]. Dostupné z: www.surynkova.info/dokumenty/mff/PG/Prednasky/prednaska_10.pdf
- [11] STRYCH, Václav. *Triangulace a editování vrstevnic. Diplomová práce..* Fakulta aplikovaných věd, ZČU, 2003
- [12] KOLINGEROVÁ, Ivana; STRYCH, Václav; ČADA, Václav. *Using constraints in delaunay and greedy triangulation for contour lines improvement..* Computational science - ICCS 2004. Berlin: Springer, 2004. s. 123-130.