

# Zobrazování terénu

Jan Vaněk, Bruno Ježek

*Universita Obrany, Fakulta vojenského zdravotnictví, Katedra všeobecně vzdělávacích oborů  
e-mail: [vanek@pmfhk.cz](mailto:vanek@pmfhk.cz); [jezek@pmfhk.cz](mailto:jezek@pmfhk.cz)*

## Abstrakt

Vizualizace terénu je součástí všech geografických informačních systémů. V reálném čase jsou často zobrazovány rozsáhlé datové soubory. Přestože výkon hardwaru neustále narůstá, je nezbytné optimalizovat formu a množství vykreslovaných trojrozměrných dat terénu, aby bylo dosaženo dostatečné frekvence vykreslování. Příspěvek se zabývá návrhem vhodné reprezentace terénu a efektivní metody spravování rozsáhlých terénních dat při vizualizaci s ohledem na vlastnosti grafických procesorů. Navržené optimalizace byly úspěšně otestovány při implementaci vizualizace terénu v reálném čase s využitím běžných grafických karet pro hardwarovou akceleraci.

## 1. Úvod

V poslední době jsou geografické informační systémy (GIS) široce využívány mnoha obchodními i veřejnými institucemi k řešení řady úkolů, je proto nezbytné dále zdokonalovat techniky vizualizace používané v současných GIS. Přestože běžné dvourozměrné mapy poskytují velké množství dat, vlastní tvar terénu z nich není příliš zřejmý. Rozpoznávání tvaru krajiny z vrstevnic a jeho následné využití pro učinění kvalifikovaného rozhodnutí vyžaduje mnoho let praxe.

Prostorová vizualizace geografických dat poskytuje informace o tvaru terénu a umístění dalších objektů na mapě v přehledné a intuitivní formě. Pro uživatele je interaktivní systém s trojrozměrnou vizualizací terénu v reálném čase mnohem vhodnější.

Aby byla vizualizace terénu skutečně použitelná, musí vykreslování probíhat v reálném čase. Pouze frekvence nad 15 obrázků za vteřinu považujeme za dostatečné. Je také třeba zobrazovat terény o rozměrech stovek kilometrů s detailem deset a méně metrů. Předchozí podmínky musí být splněny na hardwaru dostupném běžnému uživateli, nesmí být vyžadován drahý profesionální hardware. Na druhou stranu je ale potřeba maximálně využívat schopnosti moderního hardwaru.

## 2. Vykreslování terénu

Optimální datová reprezentace grafické scény při vykreslování na současném uživatelsky dostupném hardwaru je trojúhelníková síť, v případě terénu pravidelná síť. Pomocí nepravidelné trojúhelníkové sítě sice můžeme popsat libovolný tvar včetně kolmých stěn, převisů či skalních bran, geometrické popisy takových útvarů však nejsou v databázích GIS uloženy a vzhledem k měřítku uvažovaných terénů mohou být tyto útvary zanedbány.

Pravidelná trojúhelníková síť, vytvořená například triangulací mapy převýšení, má několik výhod. Jednou z nejdůležitějších je úspora úložné kapacity nutné k uchování terénu. Pokud by triangulace mapy převýšení o rozměrech  $4096^2$  bodů byla uložena ve formě nepravidelné trojúhelníkové sítě s přesností 32 bitů a s nejobecnějším popisem trojúhelníků (tři indexy na trojúhelník), obsadila by více než 575 MB místo 64 MB potřebných k uchování samotné mapy převýšení se stejnou přesností.

Další výhodou map převýšení je jejich dostupnost, což souvisí s moderními metodami získávání geografických dat. Satelitní a letecké měřicí systémy poskytují právě mapy převýšení. Pokud mapy převýšení nejsou k dispozici, je možné je rekonstruovat z vrstevnic. Reprezentace terénu ve formě mapy převýšení zjednodušuje detekci kolizí pohybujících se objektů (včetně oka pozorovatele) s terénem. V každém vykresleném snímku se každý objekt posune do nové pozice. Software detekuje kolize porovnáváním nadmořské výšky objektu a nadmořské výšky interpolované z mapy převýšení, což je postup s konstantní složitostí (tedy  $O(1)$ ).

Aby byl terén vykreslován v reálném čase s dostatečnou frekvencí snímků, je nezbytné použít hardwarovou akceleraci a proto je nutné přeložit reprezentaci terénu do kompatibilních struktur – pole vrcholů a pole indexů.

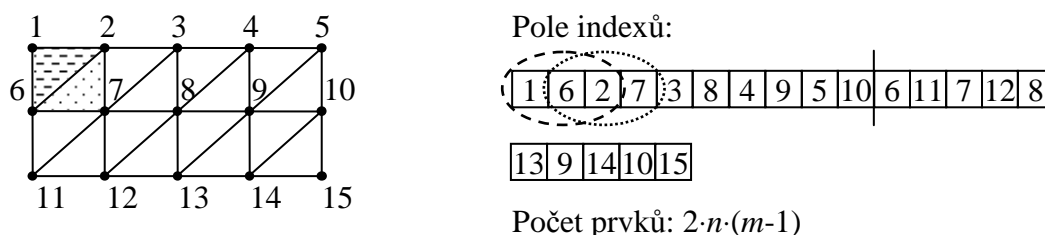
Pole vrcholů je pole záznamů popisujících jednotlivé vrcholy trojúhelníků. Záznam obsahující informace nezbytné pro úlohu zobrazování terénu se skládá ze tří reálných čísel popisujících pozici vrcholu v prostoru a dalších tří určujících normálu, všechno čísla s plovoucí desetinnou čárkou s přesností 32 bitů.

Pole indexů popisuje způsob vytváření trojúhelníků z vrcholů. Obsahuje indexy ukazující do pole vrcholů. Indexy mohou být uspořádané v různých schématech: seznam, vějíř nebo pás trojúhelníků. Seznam trojúhelníků je zcela obecný, může popisovat libovolné uspořádání trojúhelníků. Každý trojúhelník je popsán třemi indexy.

Vějíř trojúhelníků je úspornější co do počtu indexů, ale vyžaduje určitou organizaci trojúhelníků. Všechny trojúhelníky musí mít jeden společný vrchol. Až na dva krajní trojúhelníky musí každý trojúhelník přisedat ke dvěma dalším trojúhelníkům. První index v poli indexů ukazuje na společný vrchol, každé dva další po sobě jdoucí indexy určují jeden trojúhelník.

Triangulace mapy převýšení nemůže být popsána jako jeden vějíř trojúhelníků a proto musí být pole indexů zpracováváno po částech, co vějíř, to část. Tím vznikají režijní náklady, protože v Direct3D musí být pro vykreslení každé části volána funkce, v OpenGL jsou prostřednictvím display listů náklady skryté uvnitř implementace OpenGL. Mapa převýšení o rozměrech  $m \times n$  bodů je pokryta  $\frac{1}{4} \cdot (n - 1) \cdot (m - 1)$  vějíři. Aby byla takto pokryta celá mapa, musí být  $m$  i  $n$  liché.

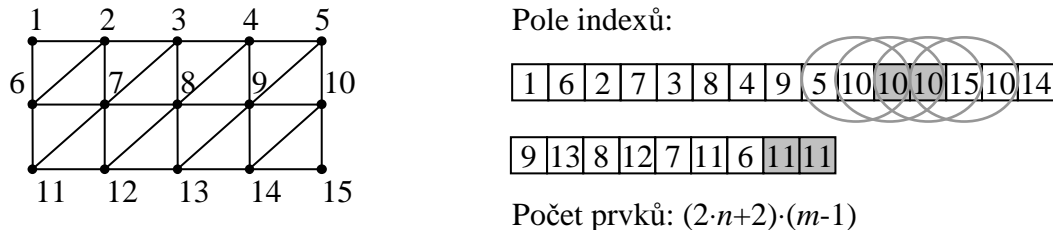
Pro triangulaci pravidelné sítě je pás trojúhelníků ještě úspornější co do počtu indexů a výrazně úspornější v počtu částí pole indexů. Libovolné tři po sobě jdoucí indexy určují jeden trojúhelník (viz Obr. 1). Pole indexů je rozděleno do  $m - 1$  částí (pás na řádek), režijní náklady jsou výrazně nižší než v případě vějíře trojúhelníků, přesto jsou nezanedbatelné.



**Obr. 1: Pás trojúhelníků**

Režijní náklady vzniklé zpracováním pole indexů po částech zatěžují především CPU. Protože triangulaci mapy převýšení není možné efektivně zobrazit bez režijních nákladů spojených s použitím vějíře nebo pásu trojúhelníků, je vhodnější nahradit režijní náklady jinou formou dodatečných výpočtů. Triangulaci pásem trojúhelníků je modifikovaná tak, že celá mapa převýšení může být popsána jediným pásem. Toho je možné dosáhnout přidáním

čtyř trojúhelníků (dvou indexů) v každém řádku mapy. Tyto trojúhelníky jsou degenerované, protože alespoň dva indexy ukazují na stejný vrchol, a nejsou tedy viditelné. Tak jsou režijní náklady zatěžující CPU nahrazené menším množstvím jednodušších operací, které provádí procesor na grafické kartě (GPU). Dobře navržená GPU by měla rozpoznat degenerované trojúhelníky a při vykreslování je přeskočit. Dodatečné náklady spojené s přidáním degenerovaných trojúhelníků jsou tedy minimální.



**Obr. 2: Pás s degenerovanými trojúhelníky**

Na Obr. 2 jsou vyznačeny přidání indexy a degenerované trojúhelníky. Jeden index (a tedy jeden trojúhelník) je přidán kvůli zachování správné orientace vrcholů trojúhelníků. Jinak by liché řádky při zapnutém odstraňování odvrácených ploch nebyly vykresleny. S vypnutým odstraňováním odvrácených ploch stačí přidat jeden index, tři trojúhelníky.

Z Tabulky 1 je patrné, že pás trojúhelníků s degenerovanými trojúhelníky je nejefektivnější popis triangulace mapy převýšení. Během testů na počítači s procesorem P3 1 GHz a grafickou kartou GeForce4 Ti 4400 se na některých terénech zdvojnásobila frekvence vykreslování při přechodu z pásu trojúhelníků na pás s degenerovanými trojúhelníky. Při všech testech došlo k nárůstu frekvence vykreslování.

Uspořádání PI	Počet prvků PI	Počet částí PI	$m = n = 1025$	
			Velikost [MB]	Počet částí
Seznam troj.	$6 \cdot (n-1) \cdot (m-1)$	1	24	1
Vějíř troj.	$\frac{5}{2} \cdot (n-1) \cdot (m-1)$	$\frac{1}{4} \cdot (n-1) \cdot (m-1)$	10	262144
Pás troj.	$2 \cdot n \cdot (m-1)$	$m-1$	8,008	1024
Degener. troj.	$(2 \cdot n + 2) \cdot (m-1)$	1	8,016	1

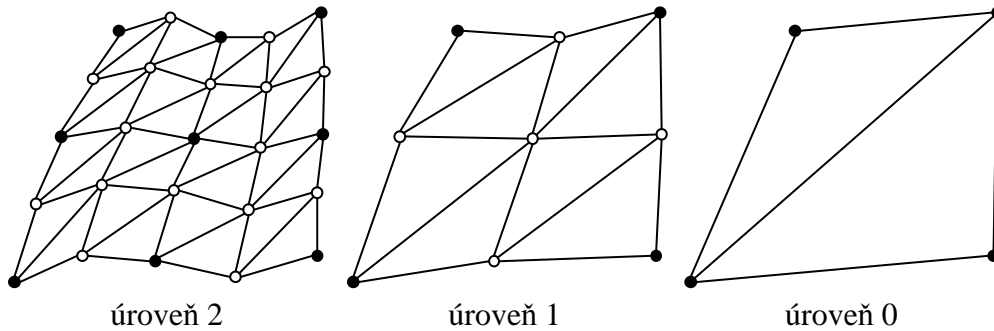
**Tabulka 1: Přehled uspořádání pole indexů (PI)**

Volba vhodné reprezentace terénu není sama o sobě postačující pro vykreslování v reálném čase. Triangulace mapy převýšení o  $10\,000^2$  bodech (terén  $100 \times 100$  km s detailem 10 m) sestává přibližně z dvou set miliónů trojúhelníků a v nejkompaktnější reprezentaci popsané výše zabírá přes 3 GB paměti (na grafické kartě). K udržení frekvence vykreslování přes 15 snímků za vteřinu by GPU musela zpracovat víc než tři miliardy trojúhelníků za vteřinu. Takový hardware v dohledné budoucnosti nelze očekávat a navíc nároky na velikost a detail zobrazených terénů porostou rychleji než výkon hardwaru. Proto je nutné snížit počet vykreslovaných trojúhelníků.

Obecné algoritmy redukce trojúhelníkové sítě nejsou vždy vhodné pro hardwarově akcelerované vykreslování. Pracují s jednotlivými vrcholy, hranami a trojúhelníky, takže často dochází ke změnám scény a tyto změny musí být přeneseny z operační paměti do paměti grafické karty. Pro hardwarovou akceleraci je mnohem vhodnější snížení složitosti větší skupiny trojúhelníků. Pravidla pro odstranění jednotlivého vrcholu jsou nahrazena

jednoduššími pravidly aplikovanými na relativně rozsáhlou skupinu vrcholů, takže nároky kladené na CPU jsou mnohonásobně nižší a ke změnám scény dochází méně často.

Výhodou mapy převýšení je možnost jednoduše ji rozdělit do navazujících plátů. Každý plát pokrývá  $(2^n + 1)^2$  vrcholů, takže je snadno možné snížit počet trojúhelníků odstraněním všech vrcholů na lichých řádcích a sloupcích (viz Obr. 3). Mapa převýšení rozdělená na  $r \times s$  plátů musí mít velikost  $r \cdot 2^n + 1 \times s \cdot 2^n + 1$  bodů, v opačném případě být vhodnou metodou převzorkována.

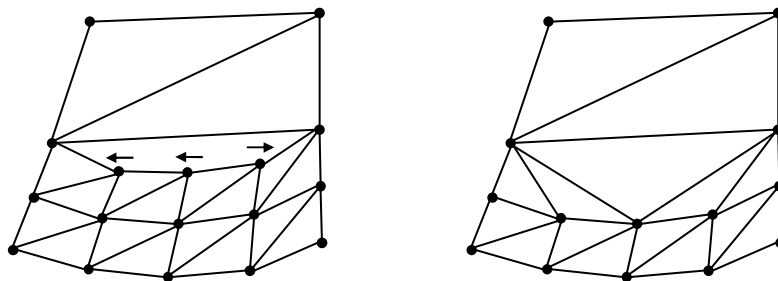


**Obr. 3: Úroveň detailu plátu**

Výsledkem odstranění lichých vrcholů z plátu o  $(2^n + 1)^2$  vrcholech je plát s  $(2^{n-1} + 1)^2$  vrcholy. Takový plát je dále možné zjednodušovat až na plát s  $2 \times 2$  vrcholy. Takže plát o  $(2^n + 1)^2$  vrcholech je možné vykreslit v  $n + 1$  úrovních detailu – plátech s  $(2^k + 1)^2$  vrcholy, kde  $k = 0, \dots, n$  určuje konkrétní úroveň detailu plátu.

Ukazuje se, že je vhodné úroveň detailu vypočítávat na základě vzdálenosti plátu od oka pozorovatele. Například: je-li *vzdálenost* menší než *dolní mez*, je  $k = n$ , jinak když je *vzdálenost* větší než *horní mez*, je plát v úrovni 0, jinak je  $k = n \cdot \left(1 - \left(\frac{\text{vzdálenost} - \text{dolní mez}}{\text{horní mez} - \text{dolní mez}}\right)^{\text{exp}}\right)$ . Volbou parametrů *dolní mez*, *horní mez* a *exp* může uživatel nastavit celkovou úroveň detailu scény.

V případě sousedních plátů s různou úrovní detailu se na jejich okrajích objevují trhliny. K odstranění je nutné změnit geometrii scény, která je uložena v polích vrcholů a indexů. Pro každou úroveň detailu je předem vygenerováno pole indexů, takže všechny pláty využívají pro každou úroveň detailu stejné pole indexů, což výrazně urychluje vykreslování. Proto musí být trhliny na okrajích plátů odstraněny změnou pozice vrcholů. Vrcholy plátu s vyšší úrovní detailu, které neodpovídají vrcholům plátu s nižší úrovní detailu, jsou přemístěny na pozici vrcholů, které odpovídají (viz Obr. 4).



**Obr. 4: Odstranění trhliny na okraji plátu**

Další metodou snížení počtu zobrazovaných trojúhelníků je ořezávání pohledovým objemem. Nejjednodušší implementace je vytvoření omezujícího kvádru, jeho následné promítnutí a

testování průniku průmětu s viditelným výřezem průmětny. Pláty ležící mimo viditelný výřez průmětny nejsou dále zpracovávány.

### **3. Závěr**

V této práci byla popsána řešení několika problémů týkajících se zobrazování terénu v reálném čase s využitím běžně dostupného grafického hardwaru. Pro optimální reprezentaci terénu bylo jako nejefektivnější popis triangulace mapy převýšení sestaveno rozšíření pásu trojúhelníků o degenerované trojúhelníky. Aby bylo umožněno vykreslování rozsáhlých map převýšení, byla navržena metoda rozdělení terénu na pravidelné pláty zobrazované v různých úrovních detailu. Byl vyřešen i problém navazování sousedních plátů s různými úrovněmi detailu. Všechny navržené postupy byly implementovány a otestovány na několika počítačích s běžně dostupnou výbavou. Byly testovány mapy převýšení s různým rozlišením od  $1025^2$  až do  $20481^2$  bodů na několika sestavách počínaje procesorem P3 1 GHz a grafickou kartou nVidia GeForce4 Ti 4400 a konče procesorem P4 3 GHz a grafickou kartou ATI Radeon 9800. Pro každou mapu a hardwarovou konfiguraci bylo možné nastavit parametry úrovně detailu tak, že průměrná frekvence vykreslování neklesla pod 15 obrázků za vteřinu a celkový detail stále působil dobrým dojmem. Aby byl zachován přijatelný celkový detail, byla mapa převýšení s  $20481^2$  body (rozdělená do  $80^2$  plátů o  $257^2$  vrcholech) vykreslována s průměrným počtem 850 000 trojúhelníků na snímek.

**Poděkování.** Práce vznikla s podporou výzkumného záměru FVZ UO MO 9079301011033.