České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Bakalářská práce

Optimalizace pořadí kroků při opravách povrchových mřížek

Petr Marek

Vedoucí práce: Ing. Petr Felkel, Ph.D.

Studijní program: Softwarové technologie a management
Obor: Web a multimedia

Praha 2010

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v seznamu.
Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Brandýse nad Labem, dne 12.5.2010

Abstrakt

Tato práce se zabývá analýzou dopadů výskytu jednotlivých chyb povrchových mřížek 3D objektů na detekční a opravné algoritmy ostatních typů chyb, které se na povrchové mřížce mohou vyskytovat. Zkoumá jejich vzájemné ovlivňování, maskování, a vytváření nových chyb jako vedlejšího efektu některých opravných algoritmů. Nakonec shrnuje získané poznatky o vzájemných vlivech do optimálního pořadí kroků oprav povrchových mřížek 3D objektů.

Obsah

Seznam obrázků....9
Seznam tabulek....10
1. Úvod....11
2. Další práce....12
3. Vymezení cílů....13
4. Struktura práce....13
5. Chyby povrchových mřížek....14
5.1. Formální chyby....14
5.1.1. Plocha zhroucená do bodu....14
5.1.2. Plocha zhroucená do hrany....14
5.1.3. Samostatná hrana....15
5.1.4. Samostatný vrchol....15
5.1.5. Nepoužitý vrchol....15
5.1.6. Konkávní plocha....16
5.2. Chybná spojení....17
5.2.1. Prasklina (crack)....17
5.2.2. T-spojení (T-joint)....19
5.2.3. Díra....20
5.2.4. Překrytí (Overlap)....21
5.2.5. Nekonzistentní orientace normál....21
5.2.6. Nulový objem (zero-volume)....22
5.3. Duplicitní geometrie....23
5.3.1. Duplicitní vrcholy....23
5.3.2. Non-manifold....23
5.3.3. Identická duplicitní plocha....24
5.3.4. Neidentická duplicitní plocha....25
5.3.5. Průnik (Intersection)....25
5.3.6. Vnitřní/skrytá geometrie....26
6. Analýza vlivů různých chyb na detekční a opravné algoritmy....27
6.1. Plocha zhroucená do bodu....27
6.2. Plocha zhroucená do hrany....27
6.3. Samostatná hrana....28
6.4. Samostatný vrchol....28
6.5. Nepoužitý vrchol....28
6.6. Konkávní plocha....29
6.7. Prasklina (crack)....30
6.8. T-spojení (T-joint)....33
6.9. Díra....34
6.10. Překrytí (overlap)....36
6.11. Nekonzistentní orientace normál....36
6.12. Nulový objem (zero-volume)....39
6.13. Duplicitní vrcholy....39
6.14. Non-manifold....39
6.15. Identická duplicitní plocha....41
6.16. Neidentická duplicitní plocha....41
6.17. Průnik (Intersection)....41
6.18. Vnitřní (skrytá) geometrie....42

7. Vyhodnocení....43
7.1. Formální chyby....43
7.2. Chybná spojení....43
7.3. Duplicitní geometrie....44
7.4. Výsledné pořadí oprav....46
8. Závěr....47
9. Seznam použité literatury....48

Seznam obrázků

Obr. 1 – Konkávní plocha …. 16
Obr. 2 – Triangulace konkávní plochy …. 16
Obr. 3 – Triangulace konkávní plochy metodou „odřezávání uší“ …. 17
Obr. 4 – Příprava konkávní plochy s vnitřními dírami na triangulaci …. 17
Obr. 5 – Crack …. 17
Obr. 6 – Netradiční cracky …. 18
Obr. 7 – Oprava cracků …. 18
Obr. 8 – T-joint …. 19
Obr. 9 – T-joint a díra …. 19
Obr. 10 – Triangulace T-jointu …. 19
Obr. 11 – Díra …. 20
Obr. 12 – Příprava díry s ostrovem na triangulaci ….20
Obr. 13 – Překrytí (overlap) …. 21
Obr. 14 – Nekonzistentní orientace normál …. 21
Obr. 15 – Čítač orientací hran …. 22
Obr. 16 – Nulový objem (zero-volume) …. 22
Obr. 17 – Non-manifoldy …. 23
Obr. 18 – Detekce non-manifoldu ve vrcholu …. 24
Obr. 19 – Neidentická duplicitní plocha …. 25
Obr. 20 – Oprava průniku těles (intersection) …. 26
Obr. 21 – Konkávní plocha s duplicitním vrcholem …. 29
Obr. 22 – Extrémní případ konkávní plochy s duplicitním vrcholem …. 29
Obr. 23 – Netriangulovatelný šestiúhelník …. 29
Obr. 24 – Crack a non-manifoldem …. 30
Obr. 25 – Crack a overlap …. 30
Obr. 26 – Crack a samostatná hrana …. 31
Obr. 27 – Crack a zhroucená plocha …. 31
Obr. 28 – Crack s duplicitním vrcholem …. 31
Obr. 29 – Oprava cracku jako díry …. 34
Obr. 30 – Oprava t-jointu jako díry …. 34
Obr. 31 – Díra a non-manifold …. 35
Obr. 32 – Díra a overlap …. 35
Obr. 33 – Orientace hran na non-manifoldu …. 37
Obr. 34 – Orientace normál na non-manifoldu …. 37
Obr. 35 – Určení normál pomocí ray-tracingu …. 38
Obr. 36 – Non-manifold a díra …. 39
Obr. 37 – Oprava non-manifoldu na okraji díry …. 40
Obr. 38 – Non-manifold a zero-volume …. 40

Seznam tabulek

Tab. 1 – Vliv různých chyb na detekční a opravné algoritmy „plochy zhroucené do bodu“…27
Tab. 2 – Vliv různých chyb na detekční a opravné algoritmy „plochy zhroucené do hrany“...27
Tab. 3 – Vliv různých chyb na detekční a opravné algoritmy „konkávních ploch“..... 30
Tab. 4 – Vliv různých chyb na detekční a opravné algoritmy „cracku“..... 32
Tab. 5 – Vliv různých chyb na detekční a opravné algoritmy „t-jointu“..... 33
Tab. 6 – Vliv různých chyb na detekční a opravné algoritmy „díry“..... 35
Tab. 7 – Vliv různých chyb na detekční a opravné algoritmy „překrytí“..... 36
Tab. 8a – Vliv různých chyb na detekční a opravné algoritmy „orientace normál“..... 38
Tab. 8b – Vliv různých chyb na detekční a opravné algoritmy „orientace normál“..... 38
Tab. 9 – Vliv různých chyb na detekční a opravné algoritmy „zero-volume“..... 39
Tab. 10 – Vliv různých chyb na detekční a opravné algoritmy „non-manifoldu“..... 41
Tab. 11 – Vliv různých chyb na detekční a opravné algoritmy „ident. duplicitních ploch“.... 41
Tab. 12 – Vliv různých chyb na detekční a opravné algoritmy „průniku“..... 41
Tab. 13 – Vliv různých chyb na detekční a opravné algoritmy „vnitřní geometrie“..... 42

1. Úvod

Současná počítačová grafika se koncentruje kolem trojrozměrné reprezentace reálných objektů, ať už se jedná o odvětví lékařství, průmyslové výroby, nebo zábavního průmyslu. Poptávka po modelovacích nástrojích schopných vytvářet takovéto trojrozměrné objekty prostřednictvím počítače dala vzniknout velkému množství produktů a s tím i různých formátů, ve kterých se trojrozměrné modely ukládají. Převody mezi jednotlivými formáty se staly nutností, která ovšem přináší se sebou rizika vzniku chyb důsledkem nedokonalého převodu. Chyby nemusí vzniknout jen konvertováním mezi různými formáty, ale také během samotného procesu modelování.

Zatímco v některých odvětvích nemusí některé chyby přímo vadit, může v jiných odvětvích například součástka vyrobená podle chybného modelu způsobit závažné škody, případně i zranění či úmrtí. Hledání a oprava chyb je tedy důležitou součástí manipulace s 3D objekty. Avšak ani oprava samotná nemusí být bezproblémová, a může být sama zdrojem některých chyb, případně může zbůsobit jejich zamaskování.

Práce, které se zabývají algoritmy k detekci a opravě chyb v povrchových mřížkách se spíše zaměřují jen na určitý konkrétní typ chyby, případně omezené množství různých druhů chyb. I když tedy existuje celá řada různých popsaných algoritmů, jejich vzájemné působení je velmi často opomíjené. Přesto je správně vyřešené vzájemné působení mezi jednotlivými detekčními a opravnými algoritmy v komplexnějších programech stejně důležité, jako samotné algoritmy sloužící k detekcím a opravám.

Pochopení funkce jednotlivých algoritmů, odhalení jejich slabin, předností a skrytých problémů je časově i psychycky náročná analytická činnost. Vyžaduje vymýšlení a analýzu nejrůznějších kombinací, od těch základních, běžně prezentovaných v různých knihách a odborných pracech, až po ty nejbizardnější případy. Tato činnost je však důležitým stupněm k vytvoření kvalitní komplexní a robustní aplikace sloužící k opravám nejrůznějších chyb povrchových mřížek 3D objektů.

2. Další práce

Základy této bakalářské práce vychází z diplomové práce pana Daniela Veleby: *„Opravy nekonzistentních povrchových sítí“*[1]. Ta se zabývá hledáním komplexního matematického vzorce, který by přes různé variace součtů ploch, vrcholů a hran dokázal jednoznačně a rychle rozhodnout o korektnosti testovaného 3D modelu, a identifikovat, kterým typem chyby je model zasažen. I když zde opouštíme myšlenku čistě algebraického přístupu, používáme některé prvky, které z Velebovy práce pocházejí.

Přebíráme klasifikaci chyb a pro některé detekce i myšlenku čítačů. Původní čítače bohužel postrádaly schopnost lokalizace chyby a pro naše účely tak byly nevyhovující. Místo nich je zde použito vylepšené verze čítače, která již je schopná chybu lokalizovat.

Zajímavou byla dále práce *„Fixing Geometric Errors on Polygonal Models: A Survey„*[2] od Tao Ju pojednávající o rozdílech mezi polygonálním přístupem (mesh-based aproach) a objemovým (volumetrickým) přístupem(volume-based approach). V naší práci se budeme zabývat rozšířenějším polygonálním přístupem a volumetrickou metodu ponecháme stranou. Výsledky této práce si tedy, stejně jako každý jiný postup zaměřený na polygonální mřížku, nebudou moci dokázat poradit s tzv. „polygonální polévkou“, která je doménou volumetrických metod[2].

Společná práce pánů Zhou, Zhang, Bittner a Wonka: *„Visibility-driven Mesh Analysis and Visualization through Graph Cuts“*[4] poskytuje dobrý náhled do použití ray-tracingu k detekci vnitřní geometrie, nebo nastavení normál.

V práci *„Cutting and Stitching: Converting Sets of Polygons to Manifold Surfaces“*[6] vysvětlují autoři Guéziec, Taubin, Lazarus a Horn účinný algoritmus na opravu non-manifold těles.

Akenine-Möller, a spol. ve své knize [7] vysvětluje mimo jiné algoritmus pro triangulaci konkávní plochy, triangulaci t-jointu, a shrnuje matematické rovnice pro výpočet průniku hran, nebo ploch.

Použití algoritmu *„Cutting and Stitching“* z [6] jsme v naší práci rozšířili i na průniky dvou těles. Algoritmus triangulace konkávní plochy s vnitřními dírami [7] poskytl inspiraci pro analogickou triangulaci díry s ostrovem.

3. Vymezení cílů

Naším hlavním cílem je pomocí analýzy vzájemných vlivů mezi různými chybami povrchových mřížek a detekčními a opravnými algoritmy ostatních chyb, nalézt optimální pořadí, v jakém jednotlivé typy chyb opravovat, aby se minimalizovala možnost jejich vzájemného maskování a vytváření nových chyb.

Naším úkolem bude provést důkladnou analýzu detekčních a opravných algoritmů všech chyb a prověřit jejich funkci a chování v různých případech kombinovaného výskytu chyb. Nepůjde jen o zaměření na nejběžnější případy, ale také o různé méně pravděpodobné výskyty, aby se zaručila co nejobecnější platnost výsledků zkoumání.

Na základě výsledků zkoumání máme sestavit optimální pořadí kroků oprav.

4. Struktura práce

V průběhu celé práce budeme předpokládat použití indexovaného seznamu vrcholů. Jednotlivé plochy referencují své vrcholy pomocí indexu. Dále předpokládáme použití tzv. „okřídlené hrany“ nebo DCEL.

V kapitole 5 se nejprve seznámíme s jednotlivými chybami, se kterými se můžeme v povrchových mřížkách setkat. Seznámíme se s jejich strukturou, případnými vedlejšími projevy a definujeme algoritmus určený pro detekci a pro opravu této chyby. Definování konkrétích algoritmů je klíčové pro následnou analýzu vzájemných vztahů mezi algoritmy a chybami, neboť každý algoritmus může být jinak citlivý na maskování a vatváření nových chyb.

V kapitole 6 je soustředěna analýza vzájemného působení chyb na jednotlivé algoritmy. Postupně je prováděna detailní analýza chování jednotlivých detekčních a opravných algoritmů při výskytu jiných typů chyb. Záměrně jsou vybírány i netradiční, syntetické (uměle vytvořené) tvary nebo umístění chyby, aby se do hloubky prověřilo chování analyzovaných algoritmů.

Výsledky analýzy si shrneme v kapitole 7, kde postupně ze získaných poznatků sestavíme optimální pořadí kroků oprav povrchových mřížek.

5. Chyby povrchových mřížek

V této kapitole se seznámíme s možnými chybami, které mohou v povrchových mřížkách nastat a stručně se seznámíme se způsobem jejich detekce a možným způsobem opravy. Chyby, se kterými se můžeme ve strukturách povrchových mřížek setkat, můžeme rozdělit do několika hlavních skupin[1]:

- formální chyby
- chybná spojení
- duplicitní geometrie

5.1. Formální chyby

Formální chyby jsou většinou drobné chyby, které vznikly například zapisem nedodržujícím notace modelu.[1] Uživatelem většinou nejsou viditelné. Můžeme mezi ně řadit různé typy zhroucených ploch, případně by se sem daly zařadit i konkávní plochy.

5.1.1. Plocha zhroucená do bodu

O ploše zhroucené do bodu hovoříme, pokud je tvořena alespoň třemi vrcholy, a ty jsou totožné. Taková plocha má nulový obsah a představuje jeden bod v prostoru. Jelikož má nulový obsah, není (neměla by být) vykreslována a uživatelem je tak nepozorovatelná. Pro model tak ztrácí význam a pouze zesložiťuje jeho strukturu.

Detekce – K detekci této chyby nepotřebujeme žádné informace o okolní struktuře. Provádí se postupným procházením jednotlivých ploch a kontrolou unikátnosti indexu všech vrcholů kontrolované plochy. Pokud jsou všechny indexy totožné, jedná se o plochu zhroucenou do bodu.

Mohla by sem patřit i detekce stejných, nebo velice podobných souřadnic vrcholů, i když mají jiný index. Jak se ale dočteme dále v kapitole 5.3.1, tvoří body se stejnými/podobnými souřadnicemi a jiným indexem svůj vlastní druh chyby – tzv. „duplicitní vrcholy“, jejichž řešením je právě sjednocení pod stejný index. Proto nám při detekci ploch zhroucených do bodu stačí kontrolovat pouze indexy, a detekci podobných souřadnic přenechat jiné sekci.

Oprava – Jelikož je plocha koncentrována do jediného bodu, nemá žádný vliv jako spojnice a jedině dělá model složitější. Jednoduchým řešením je odstranění takovéto plochy.

5.1.2. Plocha zhroucená do hrany

Takováto plocha je reprezentována alespoň 3 vrcholy, ale jsou v ní použity pouze 2 různé indexy. Ostatní vrcholy jen opakují již použitý index. Plocha je tak koncentrována do úsečky (hrany). Stejně jako předešlý typ zhroucené plochy má i tato nulový obsah a je uživatelem nepozorovatelná. Jelikož však obsahuje dvě různé souřadnice, nemůžeme si být jisti jejím významem. Může být použita např. jako neviditelná spojnice dvou částí modelu, a může na ní být odkazováno například jako na táhlo při animaci nebo fyzikální simulaci. Na druhou stranu by se pro takovéto táhlo spíše předpokládalo použití pouhé hrany, než celé, byť zhroucené, plochy.

Detekce – Ani k této chybě nepotřebujeme pro její detekování informace o okolní struktuře. Detekci provedeme postupným procházením všech ploch modelu a kontrolou unikátnosti indexů vrcholů dotazované plochy. Pokud jsou v deklaraci plochy uvedeny pouze dva unikátní indexy, které se různě opakují, pak se jedná právě o tuto chybu. Stejně jako v předchozím případě můžeme ponechat detekci vrcholů se stejnými souřadnicemi, ale odlišným indexem, na jiné sekci, která provede jejich sjednocení pod stejný index.

Oprava – Na rozdíl od plochy zhroucené do bodu, může takováto plocha hrát již určitou roli jako spojnice. Dá se ovšem předpokládat, že ve většině případů nebude tato plocha v modelu zapotřebí a podobně jako u plochy zhroucené do bodu ji bude možné odebrat.

5.1.3. Samostatná hrana

Při konverzích napříč různými moderními formáty, které mohou ukládat různé neviditelné ovládací prvky, jako řídící táhla pro animace, ukotvení dynamického k pevnému objektu, se může stát, že se ve výčtu ploch modelu objeví i definice samostatné hrany, která ve svém původním formátu mohla spadat do speciálních řídících prvků, případně mohla vzniknout ruční editací a opomenutím třetího vrcholu.

Samostatná hrana je položka v seznamu ploch modelu, která referencuje pouze dva vrcholy. Pro porovnání – plocha zhroucená do hrany je položka v seznamu ploch modelu, která referencuje 3 vrcholy, jeden vrchol ale referencuje dvakrát.

Stejně jako plocha zhroucená do hrany je hrana samotná neviditelná a pro vizualizaci objektu nemá žádný význam. Ovšem více než u zhroucené plochy je právě zde pravděpodobnost, že tato hrana mohla plnit speciální účel.

Detekce **–** Samostatnou hranu poznáme již při čtení její definice, jelikož jí definují pouze 2 vrcholy a třetí chybí.

Oprava – Z vizuálního hlediska je zbytečná a lze ji jednoduše smazat. Je ovšem možné, i když málo pravděpodobné, že plní speciální účel a uživatel by ji rád ponechal.

5.1.4. Samostatný vrchol

Samostatný vrchol je další chybou nedodržené notace. Jedná se o položku v seznamu ploch, která referencuje pouze jeden vrchol.[1] Takováto chyba zřejmě nemůže přirozenou cestou vzniknout a jedinou možností jejího vzniku tak zůstává ruční editace souboru modelu. Samostatný vrchol není zobrazitelný a v modelu je zbytečný.

Detekce – Již při čtení jeho definice jej lze bezpečně poznat. Jedná se o definici obsahující jediný vrchol.

Oprava – Stejně jako všechny předchozí případy můžeme tuto „plochu“ tvořenou jediným vrcholem jednoduše smazat.

5.1.5. Nepoužitý vrchol

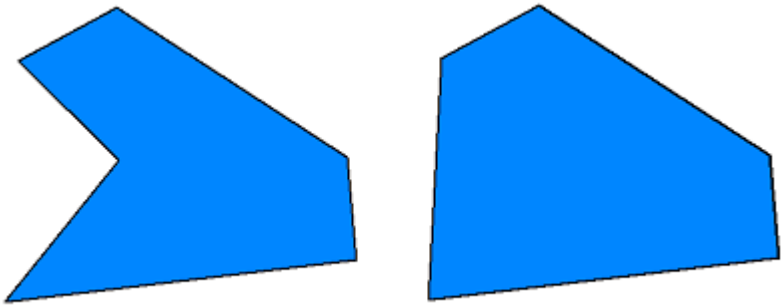
Nepoužitý, nebo také nereferencovaný vrchol je takový, který je veden v indexovaném seznamu vrcholů, ale není referencován žádnou plochou. Pro porovnání – samostatný vrchol je chybně zapsaná plocha, která referencuje jen jediný vrchol.

Detekce – Zde můžeme použít čítač referencí, který prochází všechny plochy modelu a pro každý vrchol si v indexovaném seznamu vrcholů zaznamenává počet jeho referencí. Poté jen najdeme vrchol, který má počet referencí =0.

Oprava – Tento vrchol je možné vyřadit z tabulky indexů. To způsobí posun indexu všech následujících vrcholů v tabulce o -1. Je tedy zapotřebí projít definice ploch a upravit reference na všechny vrcholy s indexem vyšším, než byl index odebraného vrcholu.

5.1.6. Konkávní plocha

Konkávní plochy jsou další chybou pouze formálního typu. Některé zobrazovací adaptéry mohou mít ovšem s vykreslováním konkávních ploch problémy a z toho důvodu je vhodné se takovýmto plochám vyhýbat.

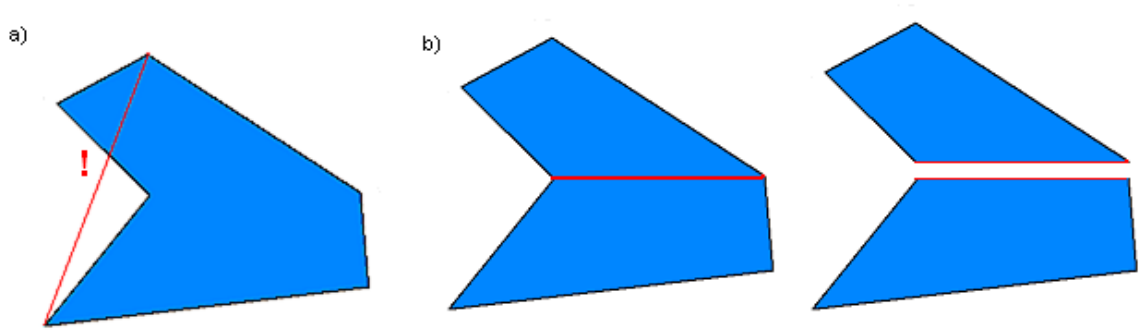


Obr. 1 - Ukázka konkávní plochy a jejího možného chybného zobrazení na některých zařízeních

Detekce – Detekce konkávních ploch je obtížná a prakticky se neprovádí.

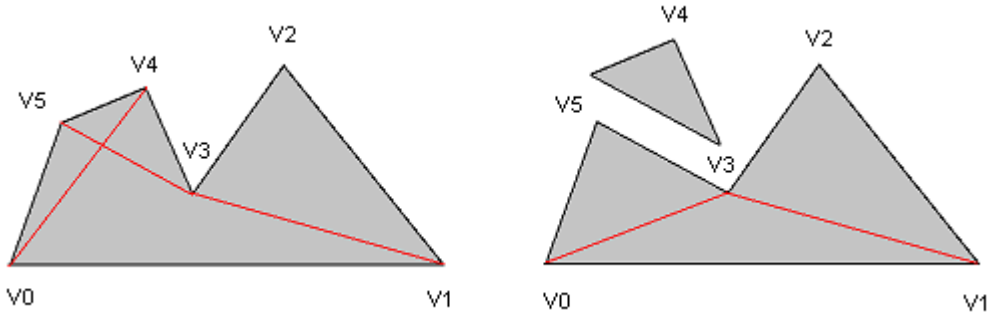
Oprava – Opravou konkávní plochy je její triangulace. Triangulace se provádí u všech složitějších ploch (počet vrcholů >3) a proto nepřítomnost detekce konkávních ploch nevadí. Existuje řada[7] triangulačních algoritmů, od těch jednodušších, avšak ne příliš efektivních ($O(n^3)$, případně $O(n^2)$), až po složitější, ovšem mnohem efektivnějších ($O(n.log(n))$, některé v typických případech dokonce $O(n)$)[7].

Nejjednodušší algoritmus triangulace ($O(n^3)$) vezme dva vrcholy a pokusí se podle jejich spojnice rozdělit plochu na dvě. Algoritmus se rekurzivně použije na každou „polovinu“, dokud nezůstanou jen trojúhelníky. Pokud by spojnice, podle které se snažíme plochu rozdělit, procházela zcela mimo plochu, nebo protínala některou z hran (z důvodu konkávnosti plochy), případně by s touto hranou byla identická, pak se tato spojnice nepoužije a zkusí se jiná.



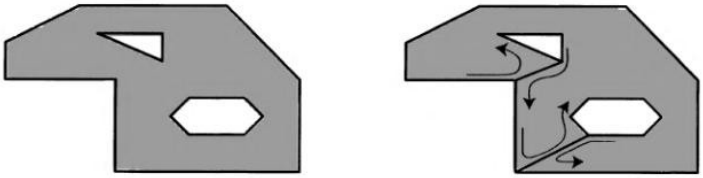
Obr. 2 - a) Spojnice dvou vrcholů vybraná k rozdělení plochy protíná jednu z hran a nelze ji použít; b) Spojnice dvou vrcholů neprotínající žádnou hranu je možné použít k rozdělení plochy

O řád efektivnější algoritmus ($O(n^2)$) je tzv. *„odřezávání uší“*, který bere vždy tři sousedící vrcholy (V_i, V_{i+1}, V_{i+2}) a pokusí se jimi definovaný trojúhelník odříznout od zbytku plochy. Opakovaně se použije na zbývající část plochy, dokud není triangulace dokončena. Stejně jako předchozí algoritmus se nepoužije k rozdělení spojnice, která by protínala některou z hran.



Obr. 3 - Vlevo nalezené „uši“ ve vrcholech V_2, V_4 a V_5. Vpravo odříznuté „ucho“ ve vrcholu V_4 a detekce nových uší ve zbývající části.

Pokud chceme triangulovat polygonální plochu, která obsahuje díry, pak ji „nařízneme“ od jejího vnějšího vrcholu k vrcholu vnitřní díry, čímž se tato vnitřní díra stane součástí vnějšího obvodu polygonu (obr. 4). Jakmile jsou všechny hrany polygonální plochy spojeny do jedné smyčky, je možné plochu triangulovat jakýmkoliv běžným algoritmem.



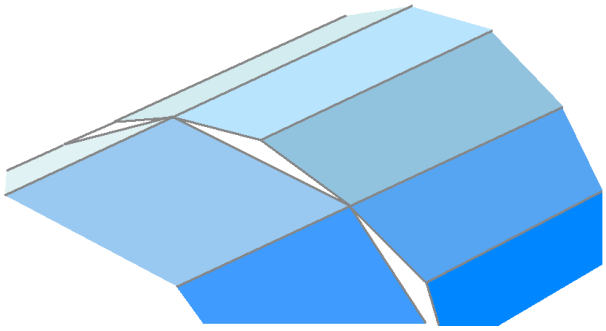
Obr. 4 – Vlevo polygonální plocha s vnitřními dírami, kterou budeme chtít triangulovat. Vpravo je nařezaná polygonální plocha připravená k triangulaci. Všechny hrany (včetně hran vnitřních děr) se dají projít pomocí jedné smyčky. (Zdroj: [7])

5.2. Chybná spojení

Chybná spojení jsou jsou viditelná na první pohled a kazí celkový dojem, jakož i kvalitu prezentovaného 3D modelu. Vznikají špatným propojením ploch mezi sebou. Nejčastějšími chybami jsou praskliny (cracky), T-spojení (T-jointy), díry a otočené normály[7].

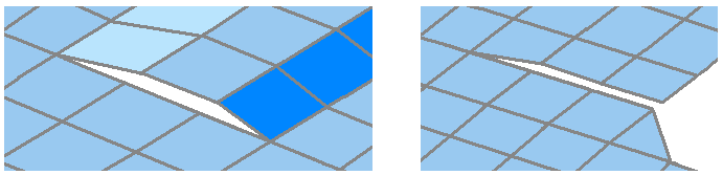
5.2.1. Prasklina (crack)

Crack nejčastěji vzniká na rozhraní dvou zakřivených ploch[7] s různou jemností vzorkování. Jedná se o úzkou mezeru vzniklou mezi hranou jedné plochy (s hrubším vzorkováním) a vrcholem protilehlé plochy (s jemnějším vzorkováním), přičemž krajní vrcholy jsou sdílené oběma plochami.



Obr. 5 - Ukázka cracků na rozhraní dvou zakřivených ploch s různým vzorkováním

Pro účely této práce rozšíříme definici cracku tak, aby pokrýval i nestandardní, v podstatě až syntetické možnosti výskytu. Crackem zde nebudeme rozumět tedy pouze nejčastější typ praskliny mezi hranou jedné plochy a jedním protilehlým vrcholem druhé plochy, ale obecně úzkou prasklinu mezi hranami/vrcholy jedné plochy a hranami/vrcholy druhé plochy.

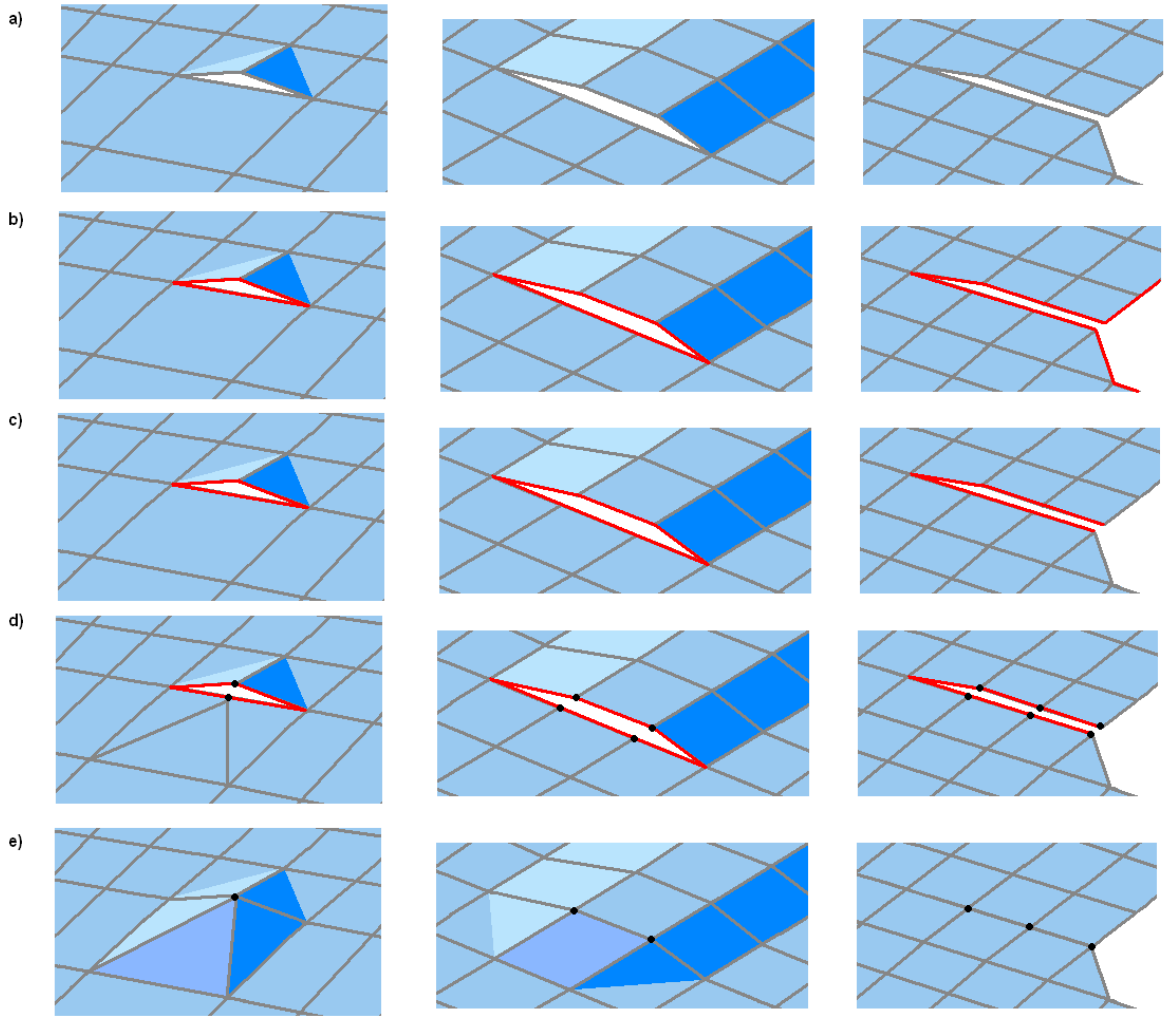


Obr. 6 - Netradiční (syntetické) cracky. Vpravo je zobrazený „otevřený“ crack, tj. crack který na jednom konci přechází v klasickou díru.

Detekce – Crack je speciální typ díry. Je-li díra dostatečně úzká, dá se považovat za crack. Pokud je mezera mezi hranami/vrcholy příliš velká, je možné ji považovat za běžnou díru. Detekce tedy probíhá stejně jako u děr (viz kapitola 5.2.3.), pouze za ní následuje kontrola vzdálenesti vrcholů, od protilehlých hran.

Oprava – Pokud je na jedné straně cracku méně vrcholů, než na protilehlé straně, doplní se dostatečné množství vrcholů, aby se jejich počet vyrovnal. S tím je zapotřebí provést retriangulaci strany, která měla hrubší vzorkování. Jakmile je počet vrcholů na obou stranách shodný, přitáhnou se vždy 2 protilehlé vrcholy k sobě a spojí se do jednoho vrcholu. Zde jsou dvě možnosti, jak vrcholy k sobě přitáhnout:

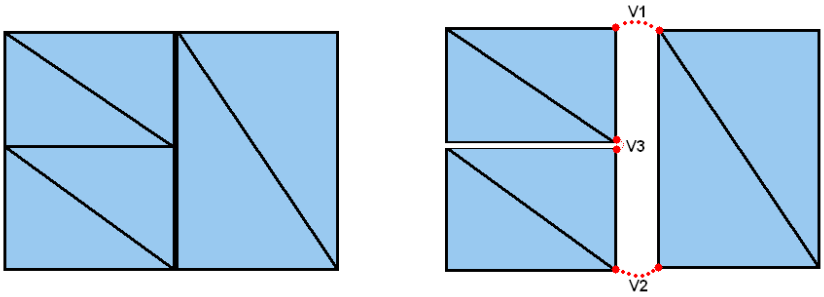
1) vrcholy na straně, která měla původně jemnější vzorkování zůstanou na svém místě, přesunou se vrcholy ze strany, která měla původně hrubší vzorkování;
2) oba vrcholy se přesunou do místa ½ jejich vzájemné vzdálenosti.



Obr. 7 - Oprava různých cracků.
a) výchozí stav; b) detekované okraje díry; c) ponechány okraje s dostatečně úzkou mezerou (tento krok se projevil pouze u cracku vpravo, který navazuje na díru – vyloučily se okraje „velké“ díry); d) srovnání počtu vrcholů na obou stranách a retriangulace; e) sloučení protilehlých vrcholů

5.2.2. T-spojení (T-joint)

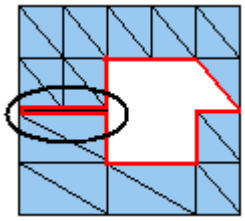
T-spojení (T-joint) je dalším speciálním typem díry. Může vzniknout na rozhraní dvou rovných ploch s různou hustotou vzorkování. O t-spojení hovoříme, pokud se na rozhraní dvou ploch s různou hustotou vyskytují vrcholy, které nesousedí s žádným vrcholem protější plochy (obr. 8).



Obr. 8 - Klasické T-spojení. Vrcholy V_1 a V_2 jsou společné pro obě strany, avšak V_3 se vyskytuje pouze na straně s jemnějším vzorkováním. Hrana V_1 - V_2 se zdá společná pouze opticky. Ve skutečnosti je tato hrana pouze na jedné straně, druhá strana je tvořena hranami V_1 - V_3 a V_3 – V_2

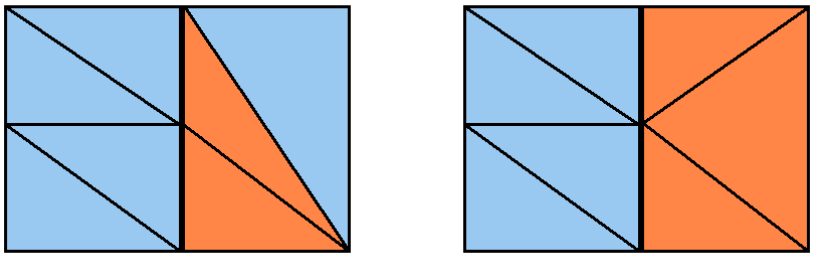
Detekce – T-joint je možné detekovat stejným způsobem jako díru (viz 5.2.3.), jelikož jsou hrany sdílené pouze opticky. Ve skutečnosti se jedná o tři hraniční hrany. Díra tvořená T-jointem se liší od díry klasické jen svým nulovým obsahem. Jakmile jsou tedy detekovány hraniční hrany, provede se triangulace díry a prověří se obsah jednotlivých trojúhelníků díry, nejsou-li nulové. Trojúhelníky s nulovým obsahem označují T-joint.

Detekce nulového obsahu může svádět k porovnávání celkového obsahu díry namísto porovnávání jednotlivých trojúhelníků triangulované díry. Celkový obsah díry by mohl T-joint zastínit v případě, kdy T-joint na jednom konci přechází v klasickou díru, podobně jako „otevřený“ crack v 5.2.1. (viz. Obr. 9).



Obr. 9 - T-joint (zakroužkovaný) přechází na jednom konci v klasickou díru. Červeně zvýrazněné jsou hraniční hrany detekované jako díra. Celková plocha této díry je zřetelně >0, čímž maskuje existenci T-jointu.

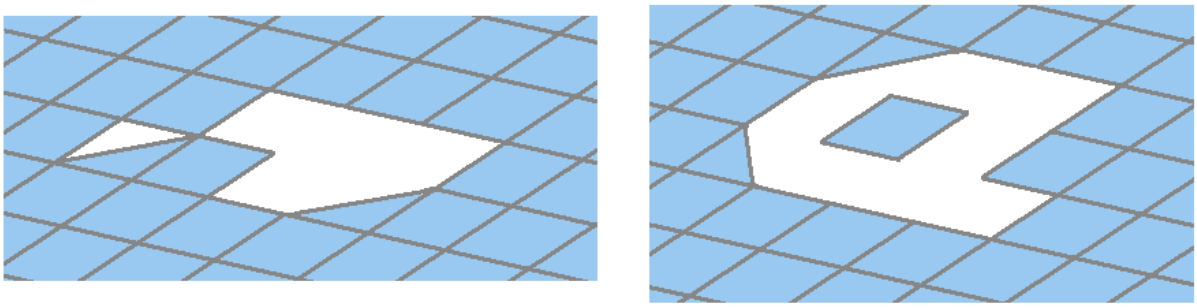
Oprava – T-joint opravíme přidáním vrcholu na stranu s hrubším vzorkováním a přetriangulováním. Abychom se vyhnuli úzkým dlouhým trojúhelníkům, je potřeba retriangulaci rozšířit případně i o sousední trojúhelník.



Obr. 10 - Přidání vrcholu na stranu, kde vrchol chybí, nás donutí retriangulovat zasaženou plochu (oranžová oblast). Nejjednodušší triangulace (obr. vlevo) vytvoří ovšem úzké dlouhé trojúhelníky, kterých se chceme vyvarovat. Rozšíříme tedy retriangulovanou oblast o sousední trojúhelník, abychom dosáhli lepšího výsledku (obr. vpravo).

5.2.3. Díra

Pokud v modelu chybí nějaké plochy, hovoříme o díře. Díra vznikne v povrchu modelu například při nekvalitní konverzi mezi formáty, při které dojde k vypadnutí některých ploch, nebo při 3D skenování.



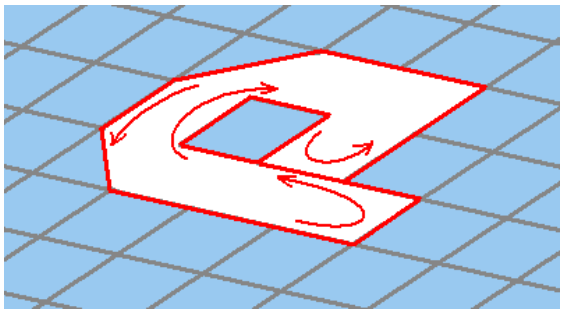
Obr. 11 - Příklad klasických děr. Vlevo je díra s chybějícími hranami, plochami, a jedním chybějícím vrcholem. Vpravo je díra s chybějícími hranami a plochami a tzv. „ostrovem“

Detekce – K detekci díry využijeme tzv. „okřídlené hrany“ nebo DCEL. Abychom nalezli díru musíme nalézt hraniční hrany této díry. Každou z hran tedy prověříme, zda sousedí s 2 plochami. Pokud sousedí jen s jednou plochou, jedná se o hraniční hranu, kterou si zaznamenáme. Ve výsledku by hraniční hrany měly vytvořit uzavřené smyčky (1 smyčka pro každou díru a navíc 1 smyčka pro každý ostrov).

Je nutné mít na paměti, že detekce hraničních hran vytvoří smyčky i v místech cracků (5.2.1.) a T-jointů (5.2.2).

Oprava – Nejjednodušší opravou díry je triangulace a vyplnění oblasti ohraničené hraničními hranami. Pokročilejší algoritmy používají pro lepší rekonstrukci původního modelu buď kubickou interpolaci prostoru díry za pomoci vrcholů v jejím okolí (z okolních bodů promítnou přes díru kubickou křivku, podle které provedou rekonstrukci), nebo využívají referenčního modelu, ze kterého interpolací doplňují chybějící informace rekonstruovaného modelu.[2]

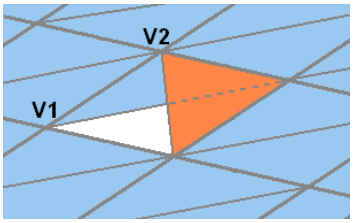
Oprava díry s ostrovem, v podstatě samotná identifikace ostrova v díře, je pro automatický systém poněkud náročnější a pro dosažení kvalitních výsledků je nutná interakce s uživatelem. Při ní může uživatel například identifikovat, které detekované smyčky jsou vnější hranice díry, a které jsou naopak hranice ostrova, a může například i pomoci s přiřazením ostrovů k dírám. Jakmile je ostrov identifikován a přiřazen, může nastoupit triangulace díry. Tu provádíme obdobným postupem jako při triangulaci polygonální plochy s vnitřními dírami popsané v kapitole 5.1.6., jen se zde namísto vnitřních děr vyskytují ostrovy.



Obr. 12 - Díra s ostrovem (z obr. 11) připravená na triangulaci. Detekce označila hraniční hrany ostrovu a vnější hraniční hrany díry. „Naříznutí“ triangulované oblasti od vnějšího vrcholu k vrcholu ostrovu slouží k vytvoření jediného obvodu, který by obsahoval všechny hraniční hrany.

5.2.4. Překrytí (Overlap)

Překrytí představuje trojůhelník (obecně plochu), který se některou svou částí překrývá s jiným trojúhelníkem (plochou). Může například vzniknout během chybné triangulace[1], kdy se jeden z vrcholů trojúhelníka umístí do špatného bodu. Doprovodným jevem překrytí je díra a případně i non-manifold hrana.



Obr. 13 - Jeden z vrcholů oranžově zvýrazněného trojúhelníku se chybně umístil do bodu V_2, místo do bodu V_1, čímž způsobil překrývání části nového trojúhelníku s částí již umístěného trojúhelníku.

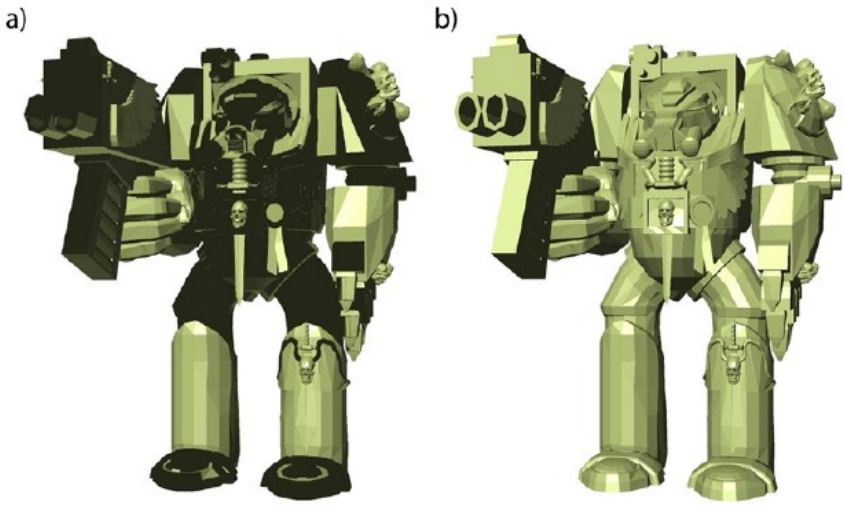
Detekce – Chceme-li zkontrolovat, zda-li se trojúhelník nepřekrývá s jiným, vybereme trojúhelníky, které se nacházejí v jeho okolí (např. za použití kd-stromu), a pomocí výpočtů popsaných v [7] v kapitole 16.11 zjistíme, zda se testovaný trojúhelník s některým z těchto trojúhelníků nepřekrývá.

Oprava – Vzhledem k variabilitě, která může u této chyby nastat, je v podstatě nemožné identifikovat vrchol, který je špatně umístěn, a následně identifikovat vrchol, do kterého měl správně patřit. Jistotu bychom měli jen v opravdu ideálním případě. Obecně nelze tedy předpokládat, že by se podařilo opravit pozici špatně umístěného vrcholu.

Další možností, jak se s touto chybou vypořádat, je odstranit jeden z překrývajících se trojúhelníků a na zanechanou díru následně použít algoritmus pro opravu děr.

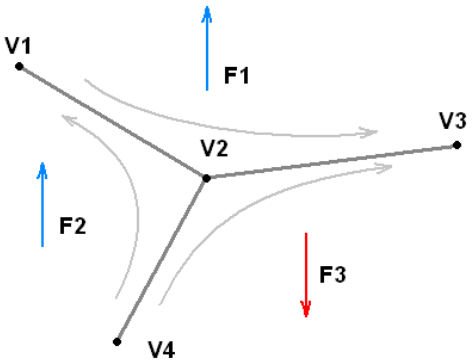
5.2.5. Nekonzistentní orientace normál

Orientace normál může být určena buďto normálovým vektorem definovaným zvlášť pro každou plochu, nebo pořadím vrcholů (ve směru/proti směru hodinových ručiček). Zde budeme pracovat s druhou možností – pořadím vrcholů.



Obr. 14 - a) Nekonzistentní orientace normál; b) model se správně natočenými normálami (Zdroj: [1])

Detekce – Plochu s opačným pořadím vrcholů nalezneme pomocí čítače orientace hran (viz obr.15).



	->	<-
V1 - V2	1	1
V2 - V3	2	0
V2 - V4	0	2

Obr. 15 – Modré a červené šipky označují orientaci normály v závislosti na pořadí vrcholů. Šedé šipky označují směr, ve kterém byly vrcholy zadávány. Upravený čítač z [1] nám hlásí jednu hranu ve směru V1->V2 a jednu ve směru V2->V1, což je očekavané chování konzistentní orientace ploch. Dvě shodně orientované hrany ve směru V2->V3 znamenají, že plochy které spolu přes tuto hranu sousedí (tj. F1 a F3), jsou vůči sobě otočeny obráceně. Stejně tak i plochy sousedící přes hranu V2-V4 jsou vůči sobě otočeny.

Čítač orientace hran (upravený čítač z [1]) sice detekuje nekonzistentní natočení normál v modelu a identifikuje místo, kde se nekonzistence nachází, ovšem není schopen rozhodnout, čí orientace má být považována za správnou, a čí za chybnou. K tomu je už zapotřebí ray-tracingu, který by alespoň u jedné strany trojúhelníka potvrdil správnost její orientace. Kontrola konzistence normál přes čítač by však měla být mnohem rychlejší, než raytracing pro určení normál na celém modelu.

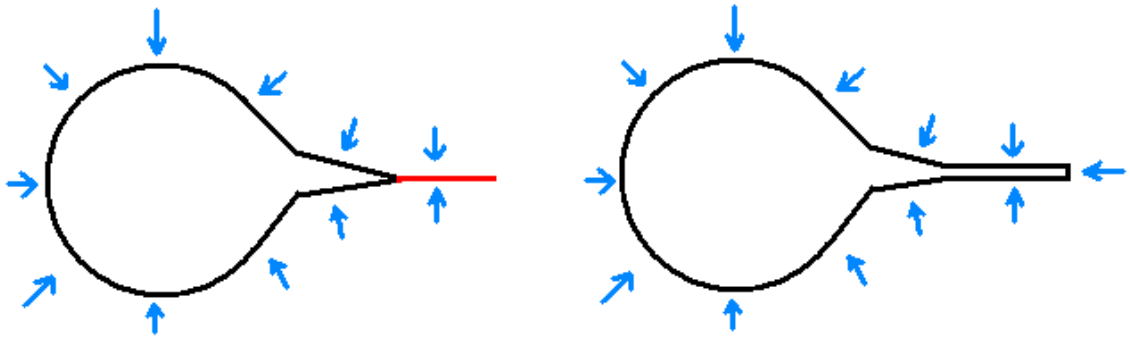
Oprava – Pokud čítač nalezne nekonzistenci v normálách, můžeme buď použít metodu ray-tracing (např. z [4]) na celý model, nebo ji použijeme jen na jednu plochu pro potvrzení její orientace a za použití lokalizační schopnosti čítače identifikujeme otočené plochy, u nichž obrátíme pořadí jejích vrcholů.

5.2.6. Nulový objem (zero-volume)

Pod touto chybou se skrývají všechna tělesa, která mají nulový objem. Zero-volume je tak například samostatný trojůhelník, nebo i několik spojených ploch, které netvoří uzavřený model s objemem větším než 0.

Jako zero-volume můžeme navíc označit i pouhou část tělesa, pokud má tato část sama o sobě nulový objem (například kormidlo lodi vytvořené za pomoci jedné plochy je možné označit za zero volume).

Detekce – K detekci zero-volume můžeme použít metodu ray-tracingu. K plochám tělesa, které má nějaký objem, se paprsky mohou dostat pouze z jedné jejich strany, neboť jejich druhá strana je stíněna právě objemem tělesa. Pokud se paprsky mohou dostat k ploše z obou jejích stran, pak je tato plocha zero-volume (obr. 16).



Obr. 16 – Vlevo řez tělesem se zero-volume plochou, vpravo řez podobným těleso bez zero-volume. Modré šipky symbolizují dopadající paprsky. Černé čáry představují plochy, na které dopadl paprsek jen z jedné strany, červená čára představuje zero-volume plochu, tj. plochu, na kterou dopadl paprsek z obou stran

Oprava – V odvětví průmyslové výroby je těleso s nulovým objemem nevyrobitelné a je tedy chybou, která by měla být z modelu odstraněna. V jiných případech se často používá abstraktního zjednodušování těles a zero-volume může být tak jen výsledkem optimalizace, než chybou (např. model vlajky, apod.). Možnosti, jak naložit se zero-volume jsou „ponechat“ nebo „smazat“.

5.3. Duplicitní geometrie

V modelu se může vyskytovat množství duplicit. Patří sem například mnohonásobné vrcholy, duplicitní plochy, ale můžeme sem zařadit například i různé protínající se 3D části modelu.

5.3.1. Duplicitní vrcholy

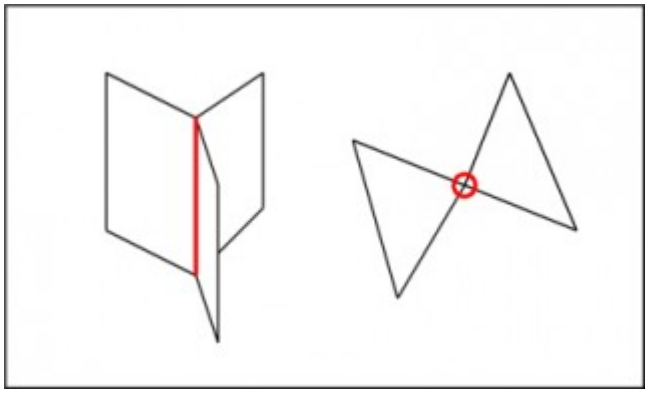
Duplicitními vrcholy rozumíme takové vrcholy, které mají shodné, nebo velice podobné souřadnice, ale jiný index.

Detekce – Vzájemně porovnáváme souřadnice různých vrcholů, zda-li nejsou shodné, nebo podobné.

Oprava – Opravou duplicitních vrcholů je jejich sjednocení pod stejný index. V definici ploch nalezneme reference na duplicitní vrcholy a změníme je tak, aby všechny odkazovaly jen na jeden z nich. Ostatní duplicitní vrcholy se tak stanou nepoužitými vrcholy, které byly probrány v kapitole 5.1.5.

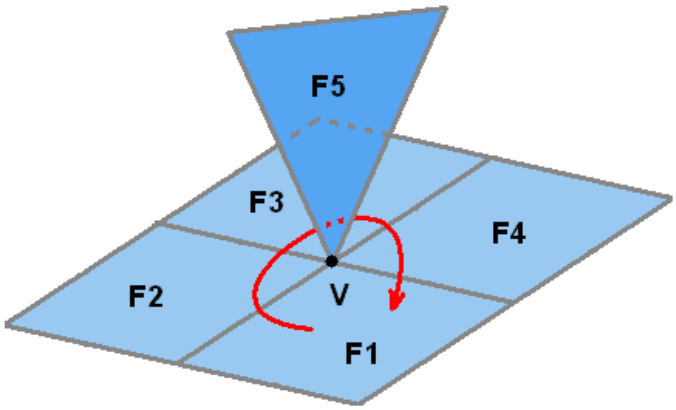
5.3.2. Non-manifold

U 3D modelů je požadováno, aby byly 2-manifoldní, tzn. aby se jejich povrch dal rozvinout do roviny bez toho, aniž by se některé části protínaly. Pokud toto nesplňuje, mluvíme o non-manifoldu. Non-manifold může vzniknout, pokud jedna hrana sousedí s více než dvěma plochami, nebo pokud je jeden vrchol sdílen dvěma plochami, které spolu ovšem nesdílí hranu.



Obr. 17 - Ukázka non-manifoldů. Vlevo non-manifold způsobený hranou sousedící s více než 2 plochami, vpravo non-manifold způsobený vrcholem sdíleným dvěma plochami, které nesdílí hranu.

Detekce – K rychlé detekci a lokalizaci non-manifoldu můžeme použít čítače, který počítá sousedící plochy pro každou hranu. Hrana, u které čítač oznámí více než 2 sousedící hrany je samozřejmě non-manifold. K detekci non-manifoldu ve vrcholu musíme pro každý uzel vzít jednu z jeho sousedících ploch, a z ní se pokusit navštívit všechny ostatní plochy, přičemž můžeme překročit pouze ty hrany, které sousedí s vrcholem, kolem kterého testujeme. Jakmile se vrátíme zpět k výchozí ploše, měli bychom mít již navštívené všechny plochy sousedící s inkriminovaným vrcholem. Pokud některá z ploch zůstala nenavštívena, jedná se o non-manifold (viz obr.18).



Obr. 18 – Testujeme vrchol V na non-manifoldnost. Začneme z plochy F1 a přes hrany postupně navštívíme všechny sousedy (F2, F3 a F4), až se vrátíme zpět do F1. S vrcholem V sousedí navíc plocha F5, kterou jsme nenavštívili, tudíž se jedná o non-manifold.

Oprava – K opravě non-manifoldní hrany je možné použít algoritmus *„Cutting and Stitching“* popsaný v [6]. Ten zjemní plochy sousedící s non-manifold hranou a z těchto zjemněných ploch smaže ty, které s non-manifold hranou přímo sousedí. Tím smaže i samotnou non-manifold hranu a vytvoří několik hraničních hran (děr), které následně zalepí.

K opravě non-manifoldu ve vrcholu je použitelný stejný algoritmus, jen místo ploch sousedích s hranou bude zjemňovat a mazat části ploch sousedících s vrcholem. Smazáním okolí vrcholu se stane tento vrchol nevyužitý. Stejně jako v předchozím případě vznikne několik hraničních hran (děr), které se zalepí.

5.3.3. Identická duplicitní plocha

Jedná se o plochu, která se v modelu vyskytuje vícekrát. Každá duplicita je definována stejnými vrcholy, jejichž pořadí se může lišit. Například:

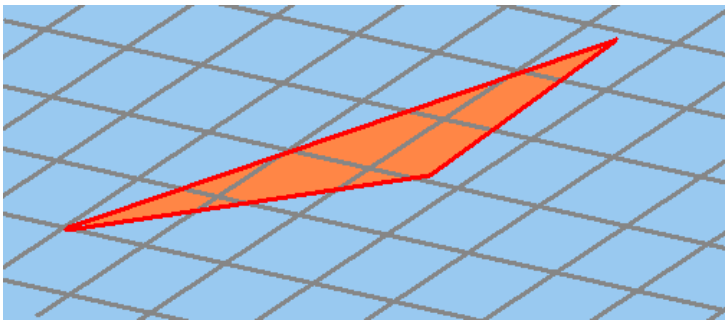
V1, V2, V3 <------- první definice takovéto plochy
V1, V2, V3 <------- druhá definice stejné plochy už znamená duplicitní plochu
V2, V3, V1 <------- i při změně pořadí vrcholů se jedná o duplicitní plochu
V3, V2, V1 <------- ani obrácené pořadí vrcholů na duplicitě nic nemění

Detekce – Identická duplicitní plocha se dá lehce nalézt čítačem, který by zaznamenával každou kombinaci vrcholů, která se v modelu vyskytne jako plocha. Pokud čítač narazí na plochu s kombinací vrcholů, kterou již zaznamenal (na pořadí vrcholů v kombinaci nezáleží), nalezl identickou duplicitní plochu.

Oprava – Identická duplicitní plocha může být jen zbytečnou duplicitou v modelu. V takovém případě je možné ji odebrat. Současně se ale může jednat například o úmyslně zdvojenou plochu reprezentující zeď, nebo membránu, která má být viditelná z obou stran.

5.3.4. Neidentická duplicitní plocha

Tato plocha pokrývá oblast, která je již zcela pokryta jinými plochami. Její kombinace vrcholů je však v modelu unikátní a neshoduje se s žádnou jinou plochou.



Obr. 19 - Neidentická duplicitní plocha (oranžová) pokrývá oblast, která je již zcela pokryta jinými plochami (modrá)

Detekce – Tuto plochu lze detekovat stejným způsobem jako překrytí v kapitole 5.2.4.

Oprava – Duplicitní plocha je s největší pravděpodobností nepotřebnou přebytečnou geometrií, kterou je možné odstranit. Na rozdíl od překrytí (5.2.4.) po ní nezůstává díra.

5.3.5. Průnik (Intersection)

U modelů složitějších těles se můžeme setkat s průniky různých části modelu do sebe navzájem. Příčinou průniku může být zjednodušení práce grafika. Tato chyba způsobuje dvě dílčí chyby – vzájemné průniky trojúhelníků (ploch), a skrytí některých ploch (vytvoření vnitřní/skryté geometrie).

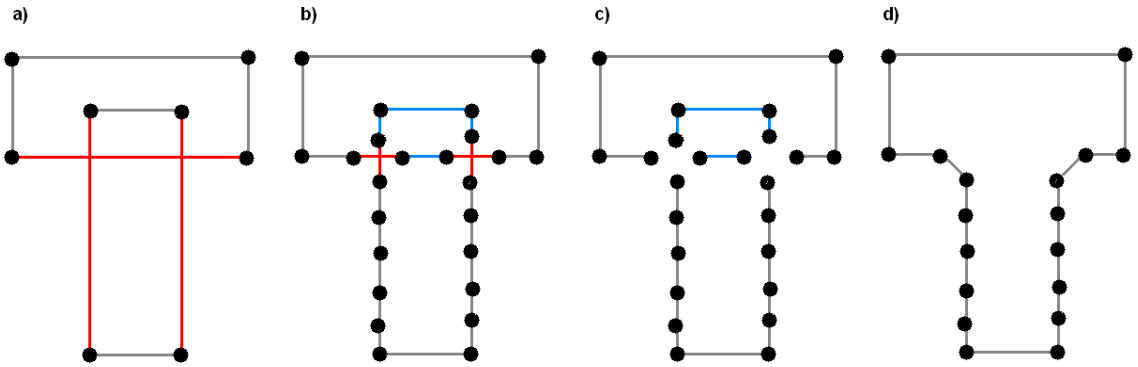
Detekce – Průnik části modelu detekujeme pomocí detekce průniku trojúhelníků (ploch), tedy stejnou metodou použitou při detekci neidentických duplicitních ploch (5.3.4.) nebo překrytí (5.2.4.). Takto identifikujeme plochy, které se navzájem protínají (obr. 20a).

Oprava – Potínající se geometrii potřebujeme rozřezat a přepospojovat tak, aby k průnikům nedocházelo a zmizela nežádoucí vnitřní část geometrie. S algoritmem provádějící podobnou činnost jsme se setkali při opravách non-manifoldů. S menšími úpravami a rozšířeními je algoritmus *„cutting and stitching“* použitelný i k opravě průniků. Máme-li tedy identifikovány všechny protínající se plochy, použijeme na ně první část algoritmu – zjemnění geometrie. Toto zjemnění zajistí, že většina plochy zůstane zachována, a že modifikována bude jen malá její část v okolí místa průniku. Pokud bychom nyní pokračovali v algoritmu *„cutting“* vzniklo by nám kvůli stále přítomným vnitřním částem geometrie příliš mnoho konců, které by se vzájemně těžko dávaly dohromady. Než tedy model rozřežeme, musíme identifikovat vnitřní části geometrie, abychom je mohli při pozdějším spojování eliminovat. O vnitřní/skryté geometrii pojednává kapitola 5.3.6. (obr. 20b).

Jakmile máme rozdělené plochy na vnitřní a vnější, můžeme opět provést detekci průniku (předchozí detekce pracovala s většími plochami, nyní máme geometrii jemnější a potřebujeme identifikovat konkrétní dílčí plochu, která je průnikem zasažena). Plochy, které se navzájem protínají, smažeme. Na rozdíl od případu duplicitní plochy, nebo překrytí, kdy jsme potřebovali smazat pouze jednu ze zasažených ploch a druhou ponechat, potřebujeme v tomto případě smazat všechny plochy zasažené průnikem. Dostaneme podobný výsledek, jako na obrázku 20c.

Nyní můžeme pokračovat v algoritmu *„cutting and stitching“* a navzájem spojit otevřené konce vnější geometrie. Vnitřní geometrii z algoritmu vynecháme. Zbývající vnitřní geometrie již nebude s největší pravděpodobností potřeba a můžeme ji vymazat. Výsledek je zobrazen na obrázku 20d.

Pokud se chceme vyhnout automatické detekci vnitřní geometrie, můžeme využít interakci s uživatelem, který by pomohl identifikovat vnitřní a vnější část.



Obr.20 – Schématický nákres opravy průniku (pohled z profilu).
a) Reprezentuje dva protínající se kvádry. Červené čáry představují plochy, které byly detekovány jako protínající se. Černé body znázorňují vrcholy.
b) První část algoritmu „cutting and stitching" provedla zjemnění geometrie protínajících se ploch. Nová detekce průniku zjistila, které z nových menších ploch jsou zasaženy. Modré čáry označují vnitřní geometrii.
c) Odebrali jsme protínající se plochy, zůstaly otevřené části vnější a vnitřní geometrie.
d) Výsledný stav po smazání vnitřní geometrie a vzájemném spojení vnější geometrie.

5.3.6. Vnitřní/skrytá geometrie

Vnitřní/skrytá geometrie zvyšuje složitost modelu, aniž by byla jakkoliv viditelná. Příkladem vnitřní geometrie může být například model hlavy, která má uvnitř vymodelován mozek. Tato geometrie může, nebo nemusí být žádoucí a její odstranění bude vyžadovat interakci s uživatelem.

Detekce – Vnitřní geometrii je možné zjistit za pomoci ray-tracingu. Pokud se paprsek dostane z plochy mimo objekt, nebo se z vnějšího okolí dostane paprsek na dotazovanou plochu (i za použití odrazů), pak je tato plocha vnější geometrií. Pokud se žádnému paprsku nepodaří dostat se mimo objekt, nebo z vnějšího prostředí dopadnout na dotazovanou plochu, pak se jedná o vnitřní geometrii. Jeden z možných algoritmů používajících ray-tracing je popsán v [4].

Oprava – Jelikož máme dvě odlišné volby, jak naložit s vnitřní geometrií – smazat nebo ponechat – z nichž nejsme schopni rozhodnout požadovanou možnost - musíme v tomto místě interagovat s uživatelem a nechat rozhodnutí na něm. Pokud se uživatel rozhodne geometrii ponechat, pracujeme s ní nadále, jako by byla součástí vnější geometrie. Pokud potvrdí její smazání, smažeme všechny plochy označené jako vnitřní. To zanechá některé vrcholy nevyužité, které bude zapotřebí podle popisu v 5.1.5. odstranit z tabulky indexů.

6. Analýza vlivů různých chyb na detekční a opravné algoritmy

V této kapitole se podíváme, jak mohou různé chyby v povrchové mřížce ovlivnit detekci a opravu jiných chyb. Postupně projdeme všechny možné chyby, se kterými jsme se seznámili v kapitole 5, a pokusíme se zjistit, zda-li může výskyt jiného typu chyb ovlivnit detekční nebo opravný algoritmus probírané chyby.

Soupis vlivů různých chyb na detekční a opravný algoritmus probírané chyby je uváděn v tabulkách. V levém sloupci tabulky je vždy uveden seznam chyb, které mají na detekční nebo opravný algoritmus nějaký dopad. V prostředním sloupci je uváděno ovlivnění algoritmu detekce, v pravém sloupci je uváděno ovlivnění algoritmu opravy. Pomlčka znamená, že daná chyba nemá na konkrétní algoritmus vliv.

6.1. Plocha zhroucená do bodu

Protože je detekce této chyby nezávislá na okolní topologii, je zřejmé, že ji přítomnost většiny jiných chyb neovlivní. Vyjímku tvoří jen *duplicitní vrcholy*. Tato chyba, pokud se vyskytne v ploše, která je zhroucená, oklame detekční algoritmus, který kontroluje pouze indexy. Plocha s 3 vrcholy majících totožné souřanice, ale každý s jiným indexem (tj. duplicitní vrcholy), by byla označena za korektní.

Smazání plochy je na okolí zcela nezávislá operace.

Pokud nebyly vrcholy této plochy referencované žádnou jinou plochou/hranou, pak oprava této chyby smazáním zhroucené plochy může jako vedlejší efekt zanechat **nevyužité vrcholy**.

	Vliv na detekci	Vliv na opravu
Duplicitní vrcholy	může chybu zamaskovat	-

Tab.1 – Jak mohou jiné chyby ovlivnit detekční a opravný algoritmus „plochy zhroucené do bodu“

6.2. Plocha zhroucená do hrany

Protože je detekce této chyby nezávislá na okolní topologii, je zřejmé, že ji přítomnost většiny jiných chyb neovlivní. Vyjímku tvoří jen *duplicitní vrcholy*. Tato chyba, pokud se vyskytne v ploše, která je zhroucená, oklame detekční algoritmus, který kontroluje pouze indexy. Plocha, kde 2 vrcholy budou mít shodné souřadnice, ale rozdílné indexy (tj. budou duplicitní), by byla označena za korektní.

Smazání plochy je na okolí již zcela nezávislá operace.

Pokud nebyly vrcholy této plochy referencované žádnou jinou plochou/hranou, pak oprava této chyby smazáním zhroucené plochy může jako vedlejší efekt zanechat **nevyužité vrcholy**.

	Vliv na detekci	Vliv na opravu
Duplicitní vrcholy	může chybu zamaskovat	-

Tab. 2 – Jak mohou jiné chyby ovlivnit detekční a opravný algoritmus „plochy zhroucené do hrany“

6.3. Samostatná hrana

Detekce této chyby je zcela nezávislá na okolní struktuře modelu. V tomto případě nevadí ani *duplicitní vrcholy*, jelikož ty nemohou změnit počet vrcholů, kterými je „plocha“ v tomto případě definována (=2).

Smazání plochy/hrany je na okolí nezávislá operace.

Pokud nebyly vrcholy této plochy referencované žádnou jinou plochou/hranou, pak oprava této chyby smazáním zdegenerované plochy může jako vedlejší efekt zanechat nevyužité vrcholy.

6.4. Samostatný vrchol

Detekce této chyby je zcela nezávislá na okolní struktuře modelu. V tomto případě nevadí ani *duplicitní vrcholy*, jelikož ty nemohou změnit počet vrcholů, kterými je „plocha“ v tomto případě definována (=1).

Smazání plochy/vrcholu je na okolí nezávislá operace.

Pokud nebyl tento vrchol referencován žádnou jinou plochou/hranou, pak oprava této chyby smazáním zdegenerované plochy (samostatného vrcholu) může jako vedlejší efekt zanechat **nevyužitý vrchol**.

6.5. Nepoužitý vrchol

Je zřejmé, že neexistuje chyba, která by dokázala zamaskovat referencovaný vrchol za nereferencovaný, nebo se naopak tvářit že referencuje vrchol, který je ve skutečnosti nereferencovaný. Detekce nepoužitých vrcholů je imunní vůči výskytu jiných chyb.

Smazání nepoužitého vrcholu z tabulky indexů a posun indexů všech následujících vrcholů je na ostatních chybách také nezávislé.

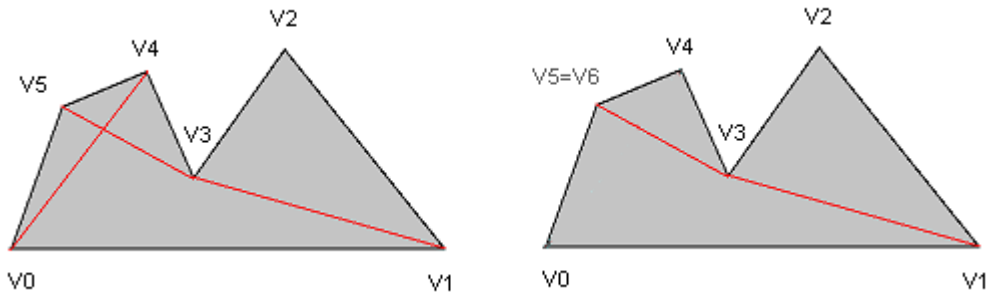
Oprava této chyby je nebezpečná kvůli vyvolávanému posunu indexů. Kromě posunutí všech následujících indexů v tabulce a přeindexování všech referencí v modelu je potřeba přeindexovat i veškeré reference, které by si opravující aplikace uchovávala ve své vlastní paměti.

6.6. Konkávní plocha

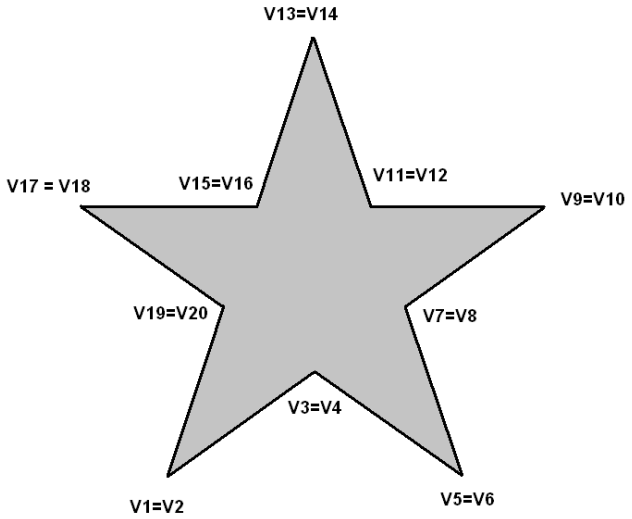
U konkávních ploch neprovádíme detekci, proto nemůže být ani ovlivněna.

Triangulace plochy je náchylná na výskyt duplicitních vrcholů. Ukázka, jak může jediný duplicitní vrchol ovlivnit například algoritmus *„odřezávání uší“* je zobrazena na obr. 21.

Extrémní případ, kdy algoritmus zcela selže, je na obrázku 22.

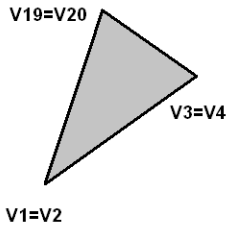


Obr. 21 - Dvě konkávní plochy, které používají algoritmus „odřezávání uší“. Červené čáry označují nalezené „ucho“. Vlevo je plocha bez duplicitních vrcholů, vpravo plocha s jedním duplicitním vrcholem V6. Algoritmus se místo ucha V4-V5-V0 snaží označit jako ucho trojici vrcholů V4-V5-V6 a dále trojici V5-V6-V0, což se mu samozřejmě nepodaří.



Obr. 22 – Extrémní případ, kdy díky duplicitním vrcholům algoritmus „odřezávání uší“ selže úplně

Algoritmus, který by se pokusil plochu rozdělit podle libovolné spojnice mezi dvěma vrcholy a nezaměřoval se jen na vrcholy *i, i+1, i+2*, by byl schopný provést několik předělů, ale nakonec by i tento skončil u ploch, které by se mu kvůli duplicitním vrcholům dále triangulovat nepodařilo (obr. 23). Jeho časová složitost je navíc *n*-krát vyšší.



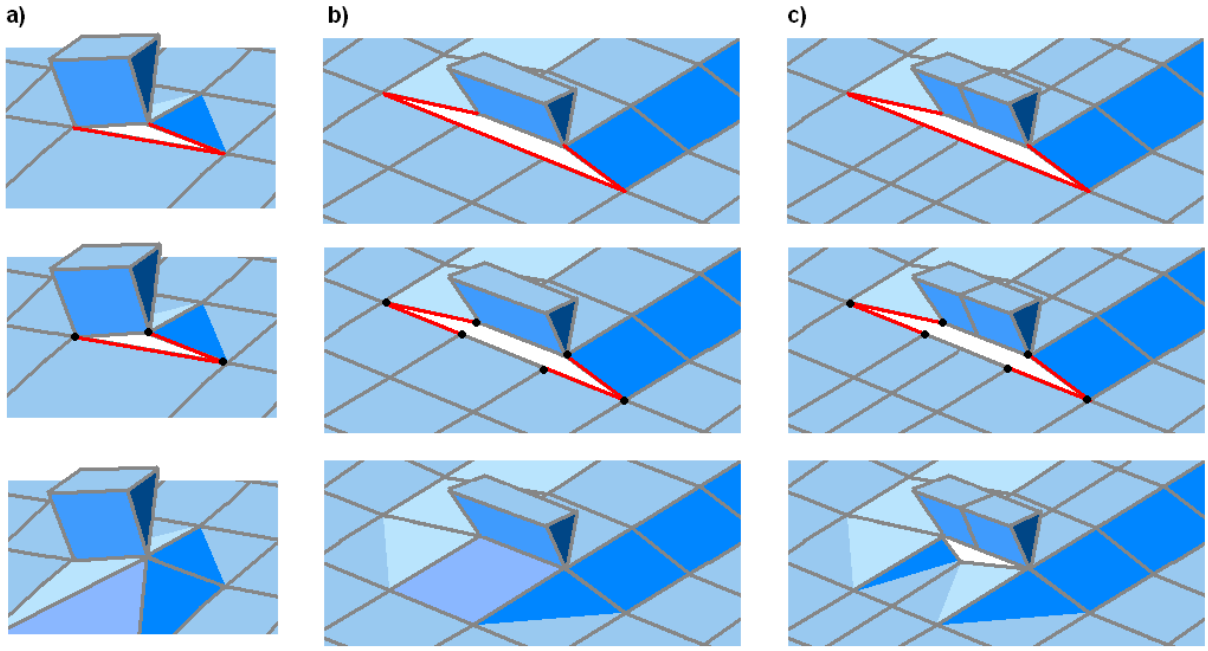
Obr. 23 – Plocha, kterou již nejde více triangulovat. I když to tak nevypadá, nejedná se ještě o trojúhelník, nýbrž o polygon V1, V2, V3, V4, V19, V20. Triangulace se snaží rozdělit plochu podle některé ze spojnic dvou různých vrcholů, ale ať vybereme kteroukoliv, vždy bude po celé své délce protínat jednu z hran plochy, tj. bude nepoužitelná.

	Vliv na detekci	Vliv na opravu
Duplicitní vrcholy	-	může zabránit úspěšnému dokončení triangulace

Tab. 3 -Jak mohou jiné chyby ovlivnit detekční a opravný algoritmus „konkávních ploch“

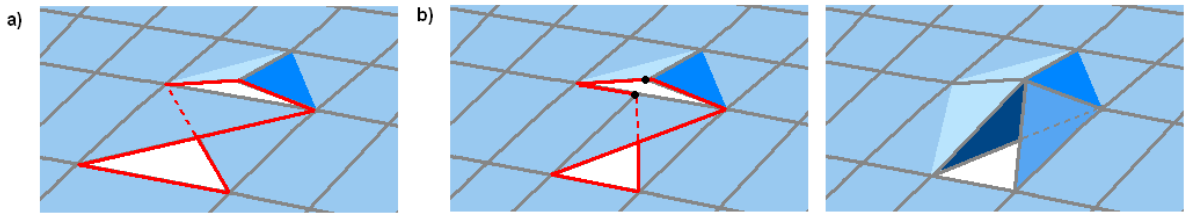
6.7. Prasklina (crack)

Protože detekce cracků vychází z detekce děr, tj. vyhledají se hraniční hrany (hrany s počtem sousedících ploch <1), může být ovlivněna chybami, které mění charakteristiku hrany. Takovou chybou je non-manifoldní hrana, která má zvýšený počet sousedících ploch. Přerušení spojení (vytvoření cracku) mezi takovouto hranou a jednou z ploch v ní sice sníží počet sousedů, ten však zůstává stále ≥2. Non-manifold tak maskuje hraniční hranu, pokud se vyskytne na okraji cracku (viz obr. 24).



Obr. 24 – Detekce a oprava cracku při výskytu non-manifoldu. a),b) Je-li non-manifoldem jen jedna hrana, Nemusí být maskováno tolik informací, aby nebyl crack opraven. c) Non-manifold zasahující alespoň 2 souvislé hrany zamaskuje takové množství informací, že se crack nemusí zcela opravit. Podobná situace nastane i u standartního cracku, pokud je non-manifoldem delší hrana (tj. hrana protilehlá vrcholu).

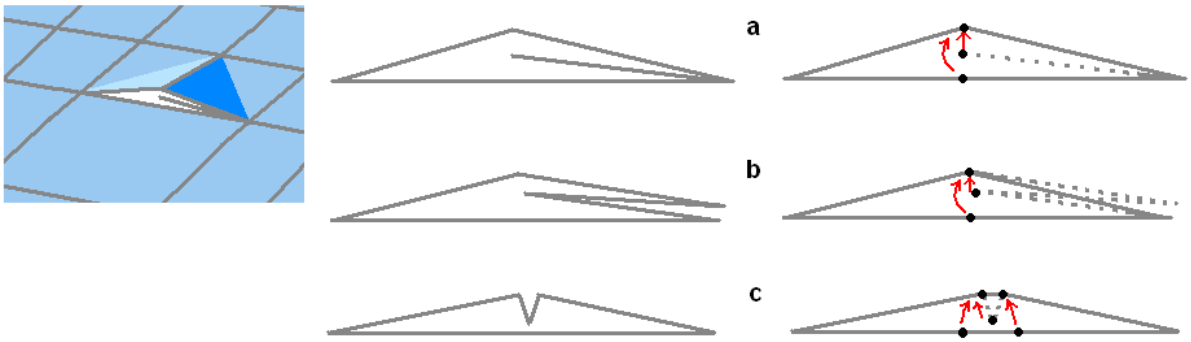
Non-manifold může být vedlejším projevem táke běžného překrytí. Jeho přítomnost tak může (i když nepřímo) ovlivnit detekci a opravu cracku (obr. 25). Duplicitní plochy (jak identická tak neidentická) mohou také způsobovat problémy, pokud vytvoří non-manifold na nevhodném místě.



Obr. 25 – a) Non-manifoldní hrana, jakožto vedlejší projev překrytí, maskuje jednu z hran na okraji cracku. Tato chybějící informace znemožňuje jeho opravu. b) Trochu jinak umístěné překrytí (a s ním i non-manifoldní hrana). Non-manifold stále maskuje jednu z hran na okraji cracku, v tomto případě je však k dispozici dostatek informací na jeho opravu (výsledek vpravo).

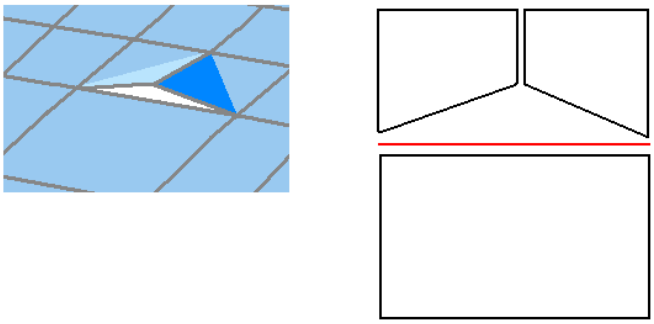
Další chyba, která komplikuje práci s crackem, i když ji přímo neznemožňuje, je samostatná hrana, nebo plocha zhroucená do hrany (obr. 26a). Variantou tohoto problému může být případ s dlouhým úzkým trojúhelníkem (obr. 26b). V těchto případech nepracujeme jen

se dvěma vrcholy, které se k sobě přitahují, ale se skupinou vrcholů, které se k sobě přitahují. Při řešení těchto extrémních případů mohou vznikat **zdegenerované trojúhelníky** (obr. 26c).



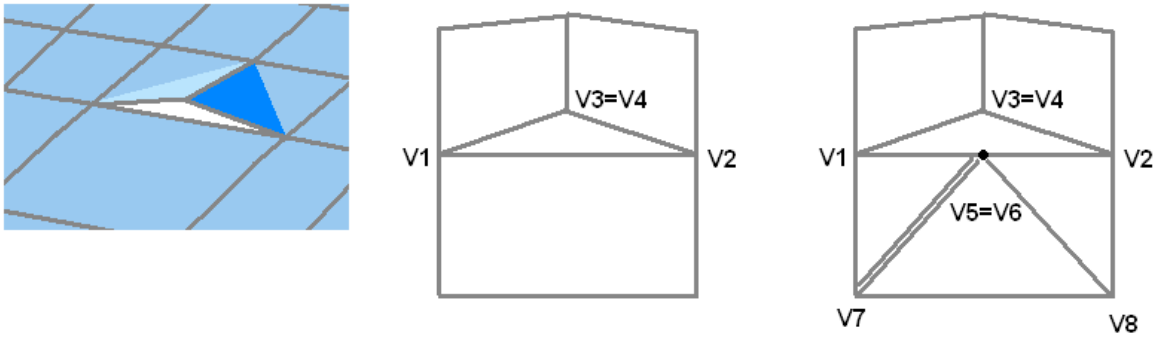
Obr. 26 – Profil cracku se samostatnou hranou.
a) Crack se samostatnou hranou. Místo dvojice vrcholů k sobě přitahujeme skupinu vrcholů.
b) Podobným případem je dlouhý úzký trojúhelník procházející crackem.
c) Jiné umístění trojůhelníku zasahujícího do cracku. Zde z trojúhelníku vznikne zdegenerovaný trojúhelník (konkrétně „plocha zhroucená do hrany“).

Plocha zhroucená do hrany může vytvářet problémy při opravě cracku, který vyžaduje přidání vrcholu na protější hranu a retriangulaci plochy (obr. 27). Přidání vrcholu na hranu takto zdegenerovaného trojúhelníku z něj pouze vytvoří čtyřúhelník zhroucený do hrany. Takováto plocha je netriangulovatelná.



Obr. 27 – Schématicky rozebraná struktura cracku s nevhodně umístěným zdegenerovaným trojúhelníkem (reprezentován červenou čarou). Právě tento trojúhelník je v tomto případě majitelem hraniční hrany cracku. Crack potřebuje na tuto jeho hranu přidat vrchol, a příslušnou plochu (tj. zdegenerovaný trojúhelník s přidaným vrcholem) retriangulovat. Zdegenerované plochy mají s triangulací problémy.

Další v našem výčtu chyb způsobujících komplikace při detekci nebo opravě cracku jsou duplicitní vrcholy. Pokud budou duplicitní vrcholy součástí obvodu cracku, můžou donutit opravný algoritmus k vytvoření duplicitního vrcholu na protilehlé straně, a následná retriangulace způsobí vznik zdegenerovaného trojúhelníku (trojúhelníku s nulovým obsahem). Po odstranění duplicit by tak zůstala **plocha zhroucená do hrany** (obr. 28).



Obr. 28 – Crack s duplicitním vrcholem V4. Opravný algoritmus je nucen vytvořit na protilehlé hraně dva vrcholy V5 a V6. Triangulace vytvoří trojúhelníky V2-V6-V8, V6-V7-V8, V1-V7-V5 a zdegenerovaný V5-V7-V6. I když duplicitní vrcholy V5 a V6 jsou pouze dočasné, než se provede jejich spojení s protějšími vrcholy V3 a V4, nově vytvořený zdegenerovaný trojúhelník zůstane po spojení zachován (jako V3-V7-V4)

Pokud se v modelu vyskytují T-jointy, budou detekovány jako cracky. Algoritmus totiž hledá díry, u nichž je vzdálenost vrcholu od protější hrany (případně protějšího vrcholu) menší než nějaká malá, předem definovaná konstanta. Tato vzdálenost je v případě t-spojení nulová (tedy zaručeně menší než jakákoliv konstanta). Detekce t-spojení jako cracků nám přímo nevadí, protože opravný algoritmus cracků provádí stejnou proceduru, jako opravný algoritmus t-jointů – přidání vrcholu a retriangulace plochy s menší hustotou. Opravný algoritmus cracků provádí jen některé operace navíc nebo složitějším způsobem, jelikož předpokládá přítomnost určité mezery mezi plochami/hranami/vrcholy.

Při opravě každého cracku vznikají **nevyužité vrcholy** (2 protilehlé vrcholy mají na počátku své vlastní indexy, po spojení mají oba jeden společný index, druhý index je již nepoužívaný).

	Vliv na detekci	Vliv na opravu
Plocha zhroucená do hrany	-	může znemožnit triangulaci po přidání vrcholu
Samostatná hrana	-	vyžaduje práci se skupinou vrcholů, namísto dvojic
T-spojení (T-joint)	T-jointy budou detekovány jako cracky	-
Překrytí (overlap)	vedlejším projevem může být non-manifold, který maskuje hraniční hrany	-
Duplicitní vrcholy	-	může způsobit vytvoření zdegenerovaného trojúhelníku
Non-manifold	maskuje hraniční hrany	-
Identická duplicitní plocha	vedlejším projevem může být non-manifold, který maskuje hraniční hrany	-
Neidentická duplicitní plocha	vedlejším projevem může být non-manifold, který maskuje hraniční hrany	-

Tab. 4 – Jak mohou jiné chyby ovlivnit detekční a opravný algoritmus „cracku“

6.8. T-spojení (T-joint)

Detekce T-spojení je podobná detekci cracku a je tedy ovlivnitelná stejnými chybami, tj. non-manifoldem a dále duplicitními plochami a překrytím, které jsou non-manifoldní hranou doprovázené (viz kapitola 6.7 pro bližší popis těchto případů).

Plocha zhroucená do hrany, může stejně jako u cracku znemožnit triangulaci. Duplicitní vrcholy mohou dále způsobit vytvoření **zdegenerovaného trojúhelníku**.

Zatímco detekce cracků byla schopna označit jako cracky i T-jointy, detekce T-jointů nemůže jako T-spojení označit cracky.

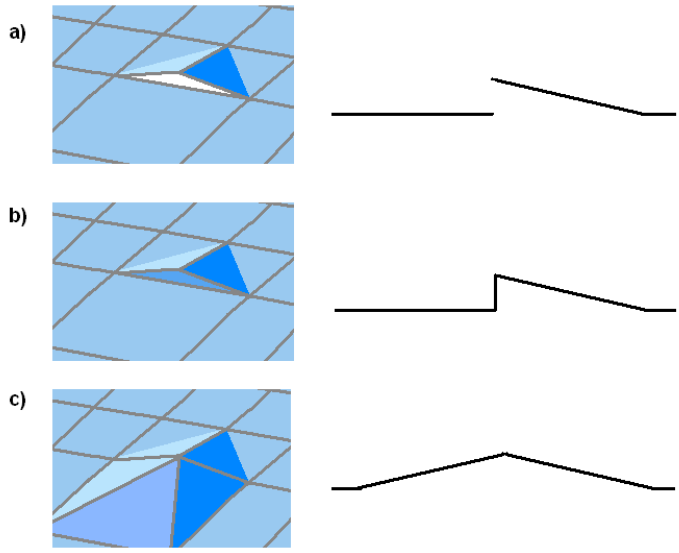
Na rozdíl od cracků nevznikají opravou T-jointů žádné *nevyužité vrcholy*.

	Vliv na detekci	Vliv na opravu
Plocha zhroucená do hrany	-	může znemožnit triangulaci po přidání vrcholu
Překrytí (overlap)	vedlejším projevem může být non-manifold, který maskuje hraniční hrany	-
Duplicitní vrcholy	-	může způsobit vytvoření zdegenerovaného trojúhelníku
Non-manifold	maskuje hraniční hrany	-
Identická duplicitní plocha	vedlejším projevem může být non-manifold, který maskuje hraniční hrany	-
Neidentická duplicitní plocha	vedlejším projevem může být non-manifold, který maskuje hraniční hrany	-

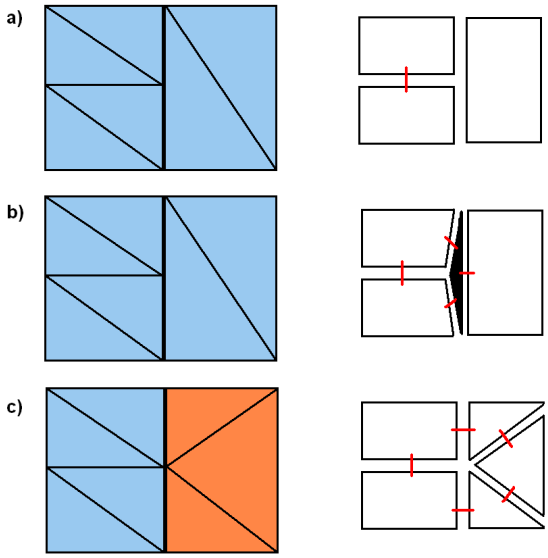
Tab. 5 – Jak mohou jiné chyby ovlivnit detekční a opravný algoritmus „T-jointu“

6.9. Díra

Detekce děr je výchozím bodem pro detekci cracků a t-jointů, jelikož tyto chyby jsou ve své podstatě určitými druhy děr. Jak cracky, tak t-jointy, pokud se v modelu vyskytují, budou označeny jako díry. Použití opravného algoritmu děr na crack by způsobilo vytvoření nechtěného „schodu“ (obr. 29b), a jeho použití na t-joint vytvoří **zdegenerovaný trojúhelník** (obr. 30b).

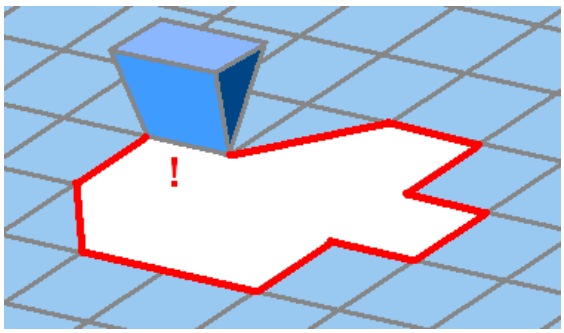


Obr. 29 - Porovnání opravy cracku jako díry, a opravy algoritmem určeným pro crack. Schémata na pravé straně znázorňují profil cracku v řezu.
a) crack před opravou; b) crack opravený jako díra; c) crack opravený jako crack



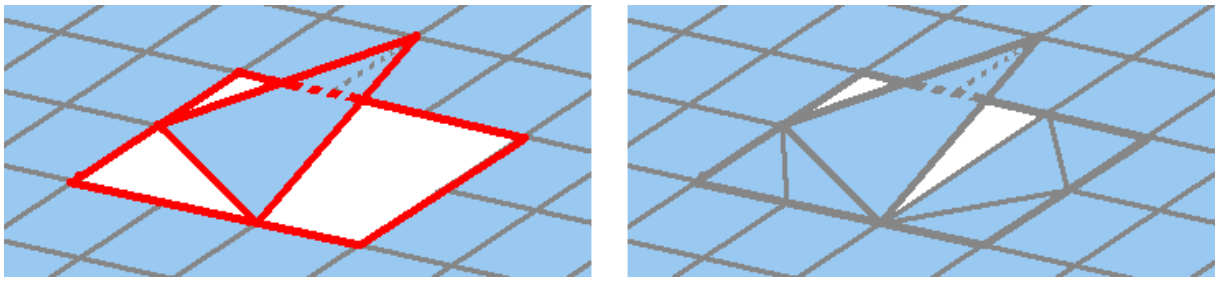
Obr. 30 – Porovnání opravy t-jointu jako díry, a opravy algoritmem určeným pro t-joint. Na pravé straně je schématické rozložení T-jointu. Červené čáry označují sousedící plochy.
a) T-joint před opravou; b) T-joint opravený jako díra. Černý trojúhelník na schématu představuje zdegenerovaný trojúhelník; c) T-joint opravený jako T-joint

Velkým problémem pro detekci a opravu děr jsou non-manifoldy. Zatím co u cracků a T-jointů jsme nepotřebovali, aby jejich hraniční hrany tvořily uzavřenou smyčku (např. otevřený crack) a jejich algoritmy byly schopné některé non-manifoldy obejít, u děr musí hrany vždy tvořit uzavřenou smyčku. Pouze uzavřená smyčka definuje geometrii, kterou je potřeba vyplnit. Výskyt jen jediné non-manifold hrany po obvodu díry znemožní uzavření této smyčky (obr. 31).



Obr. 31 – Non-manifold bránící uzavření smyčky kolem díry

Problematické jsou také překryvy a neidentické duplicitní plochy, která vytvářejí hraniční hrany. Tyto by mohly být mylně považovány za hraniční hrany skutečné díry. Překrytí může znemožnit triangulaci díry (obr. 32). V jiném případě může být překrytí nebo duplicitní plocha zdrojem non-manifoldu.



Obr. 32 – Díra s překryvem. Vlevo zvýrazněné hraniční hrany, vpravo výsledek opravy díry triangulací. Další triangulace není možná, neboť jakékoliv spojnice zbývajících vrcholů protínají některou z hraničních hran díry a není je možné k triangulaci použít

Výskyt duplicitních vrcholů po obvodu díry může také způsobit problémy s triangulací (vliv duplicitních vrcholů na triangulaci byl popsán v rámci kapitoly 6.6).

	Vliv na detekci	Vliv na opravu
Prasklina (crack)	je detekován jako díra	-
T-spojení (T-joint)	je detekován jako díra	-
Překrytí (overlap)	Vytváří chybné hraniční hrany; vedlejším projevem může být non-manifold, který hraniční hrany maskuje	triangulace nemusí opravit celou díru
Zero-volume	může být detekován jako ostrov	-
Duplicitní vrcholy	-	mohou znemožnit triangulaci díry
Non-manifold	maskuje hraniční hrany	-
Identická duplicitní plocha	vedlejším projevem může být non-manifold, který maskuje hraniční hrany	-
Neidentická duplicitní plocha	Vytváří chybné hraniční hrany; vedlejším projevem může být non-manifold, který maskuje hraniční hrany	-

Tab. 6 – Jak mohou jiné chyby ovlivnit detekční a opravný algoritmus „díry“

6.10. Překrytí (overlap)

Pro detekci překrytí požadujeme, aby byl model tvořen z trojúhelníků. Na překrytí obecných polygonálních ploch nemáme detekci a taková překrytí tedy zůstanou neidentifikovaná. Protože se následně jedná o matematickou kalkulaci prováděnou na nezávislých plochách, je detekce překrytí imunní vůči většině ostatních chyb.

V případě duplicitních ploch jsou tyto plochy logicky detekovány jako překrytí. Pokud jako opravu překrytí přijmeme smazání problematické plochy, pak nám tato „chybná“ detekce nevadí. Pokud se budeme snažit překrytí opravit přemístěním chybně umístěného vrcholu do správné pozice, potom je označení duplicitních ploch jeko překryvů nežádoucí, neboť u duplicitních ploch není přítomna díra.

Oprava překrytí smazáním zanechá po sobě **díru**, která jej doprovázela. Může odstranit některé **non-manifoldy**, pokud byly zapříčiněny daným trojúhelníkem.

Oprava překrytí přemístěním vrcholu trojúhelníku odstraní díru, která jej doprovázela (za předpokladu, že se podaří nalézt správný bod, kam vrchol patří). Stejně jako při použití metody smazáním může tato oprava odstranit některé non-manifoldy, pokud byly daným trojúhelníkem zapříčiněny.

	Vliv na detekci	Vliv na opravu
Konkávní plocha	překrytí nelze detekovat	-
Identická duplicitní plocha	je detekována jako překrytí	-
Neidentická duplicitní plocha	je detekována jako překrytí	-

Tab. 7 – Jak mohou jiné chyby ovlivnit detekční a opravný algoritmus „překrytí“

6.11. Nekonzistentní orientace normál

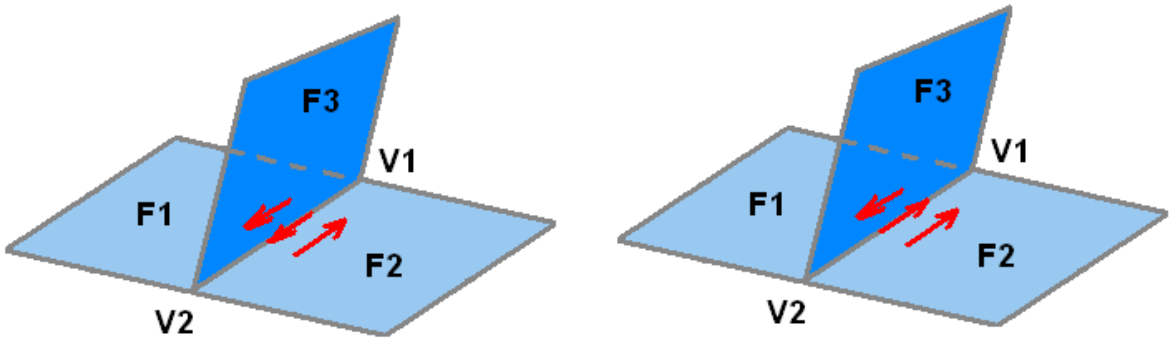
Pro tuto chybu můžeme použít dva postupy detekce a opravy – rychlejší pomocí čítače, pomalejší pomocí ray-tracingu. I při použití čítače se nakonec ale stejně neobejdeme bez inicializačního určení orientace pomocí ray tracingu. Oba způsoby mají svá citlivá místa, ve kterých jsou náchylné na zmatení algoritmu.

Nejprve se zaměříme čistě na čítač, který prověřuje orientace hran. Budeme předpokládat, že referenční orientaci máme již zajištěnou.

I při znalosti referenční orientace není možné určit směr hrany u zhroucených ploch. Hrana spojuje vždy buď dva identické vrcholy A-A, nebo existuje v orientacích A-B i B-A. Hrana A-B trojúhelníku A-B-C tak bude porovnatelná jak vůči hraně A-B trojúhelníku A-B-A, což by znamenalo nekonzistentní orientaci, tak i proti hraně B-A, což by znamenalo korektní orientaci.

Porovnávání orientace hran čítačem je odolné a spolehlivé při výskytu většiny chyb, jako například díry nebo cracky. Má ovšem problémy při výskytu non-manifoldů. Pokud například plocha F1 definuje hranu V1-V2, a plocha F2 definuje hranu V2-V1, pak jakákoliv další plocha sousedící s plochami F1 a F2 přes hranu V1-V2, musí tuto hranu definovat buďto jako V1-V2 a mít tak nekonzistentní orientaci vůči ploše F1, nebo jako V2-V1 a mít tak nekonzistentní orientaci vůči ploše F2 (obr. 33). Čítač detekuje takovouto nekonzistenci u jakékoliv non-manifoldní hrany, na rozdíl od ray-tracingu který se s některými non-manifoldy dokáže vyrovnat. Pokud se takovouto nekonzistenci pokusíme opravit, srovná se sice orientace vůči ploše F1, ale současně se tím změní orientace vůči ploše F2, kde vznikne nová nekonzistentní orientace. Takovouto nekonzistenci můžeme nazvat „střídavou“ - je střídavě nekonzistentní buď vůči ploše F1, nebo vůči ploše F2.

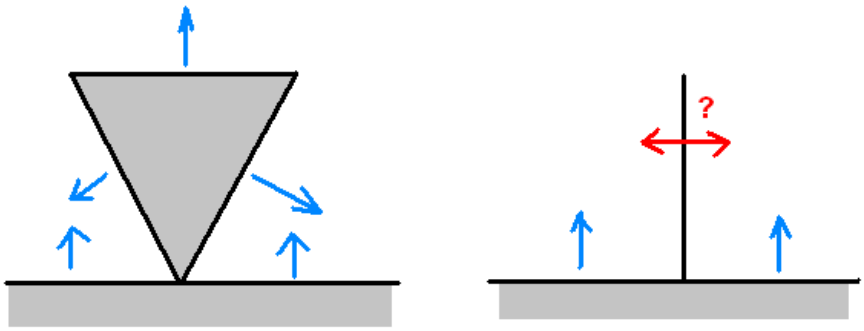
Možným zdrojem problémů jsou tak dále chyby, který mají (nebo mohou mít) non-manifold jako svůj vedlejší produkt. Takovými chybami jsou „překrytí“ a „duplicitní plochy“



Obr. 33 – „Střídavá“ nekonzistence orientace u non-manifoldu. Bez ohledu na orientaci hrany V1-V2 plochy F3 (prostřední šipka), bude střídavě docházet buď k nekonzistní orientaci mezi plochou F3 a F1, nebo mezi plochou F3 a F2.

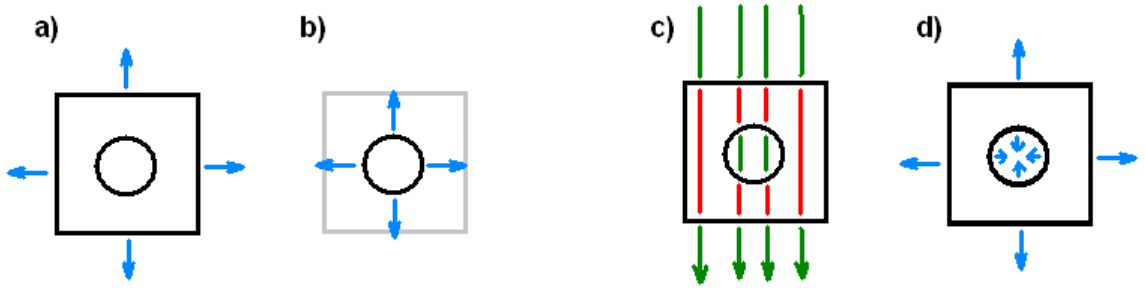
Druhou metodou pro detekci a opravu nekonzistentní orientace normál je ray-tracing. Tato metoda je velice citlivá na jakékoliv díry v modelu. Vliv menších cracků je sice schopná odfiltrovat pomocí zavedení váhy pro paprsek[7], proti velkým dírám je ale v podstatě bezbranná. Díry a cracky jsou problematické, protože paprsku umožní volně vstupovat/vystupovat z vnitřních částí modelu. Tím způsobují tyto chyby nejednoznačnou detekci správné orientace normál. Překrytí je pro tuto metodu problematickou chybou kvůli díře, která tuto chybu doprovází.

Na rozdíl od čítače nemá raytracingová metoda problémy s non-manifoldy. Není však schopná určit jednoznačnou orientaci normál u zero-volume (obr. 34).



Obr. 34 – Orientace normál na non-manifoldech (pohled z profilu). Vlevo je non-manifold uzavřené těleso a normály jsou ray-tracingem určitelné jednoznačně. Vpravo je non-manifold zero-volume a orientace normály je tak nejednoznačná.

Pro určení orientace normál ve vnitřní (skryté geometrii) můžeme použít buď systém vrstev, nebo systém rentgenového paprsku. Systém vrstev nechá paprsek dopadat nejprve na vnější viditelný plášť modelu. Viditelný povrch tvoří jednu vrstvu. Jakmile jsou určeny normály na viditelných částech (obr. 35a), aktuální vrstva se „zakáže“ a paprsek se nechá dopadat na nyní odkrytou vnitřní geometrii (další vrstva) (obr. 35b). Systém rentgenového paprsku nechá paprsek procházet skrz plochy a s každým průchodem některou z ploch mění jeho „polaritu“ mezi „vnější“ a „vnitřní“ (obr. 35c). Normály se nastaví směrem kde měl paprsek „vnější“ polaritu (obr. 35d).



Obr. 35 – Určení orientace normál u krychle, v níž je schována koule.
a) Použití vrstev – Určení normál na viditelném povrchu (1. vrstva)
b) Použití vrstev – Určení normál na další vrstvě při zakázaných předchozích vrstvách.
c) Použití rentgenového paprsku – Paprsek prochází skrz plochy a při každém průchodu mění svou „polaritu“ mezi „vnější“ (zelená) a „vnitřní“ (červená).
d) Použití rentgenového paprsku – Výsledná orientace normál při použití rentgenového paprsku

	Vliv na detekci	Vliv na opravu
Plocha zhroucená do bodu	není možné určit směr hran	-
Plocha zhroucená do hrany	není možné určit směr hran	-
Překrytí (overlap)	vedlejším projevem může být non-manifold, který způsobí nekonzistenci	může způsobit střídavou nekonzistenci normál
Non-manifold	způsobí nekonzistenci	způsobí střídavou nekonzistenci
Identická duplicitní plocha	vedlejším projevem je non-manifold, který způsobuje nekonzistenci	způsobí střídavou nekonzistenci
Neidentická duplicitní plocha	vedlejším projevem může být non-manifold, který způsobí nekonzistenci	může způsobit střídavou nekonzistenci normál

Tab. 8a – Jak mohou jiné chyby ovlivnit detekční a opravný algoritmus „orientace normál“ při použití čítače

	Vliv na detekci	Vliv na opravu
Plocha zhroucená do bodu	není možné určit, na kterou stranu paprsek dopadl	není možné určit, na kterou stranu paprsek dopadl
Plocha zhroucená do hrany	není možné určit, na kterou stranu paprsek dopadl	není možné určit, na kterou stranu paprsek dopadl
Prasklina (crack)	může dovolit paprsku projít dovnitř/ven z modelu	může dovolit paprsku projít dovnitř/ven z modelu
Díra	dovolí paprsku projít dovnitř/ven z modelu	dovolí paprsku projít dovnitř/ven z modelu
Překrytí (overlap)	vedlejším projevem je díra dovolující paprsku projít dovnitř/ven z modelu	vedlejším projevem je díra dovolující paprsku projít dovnitř/ven z modelu
Zero-volume	nejednoznačné určení správné orientace normál	nejednoznačné určení správné orientace normál

Tab. 8b - Jak mohou jiné chyby ovlivnit detekční a opravný algoritmus „orientace normál“ při použití ray-tracingu

6.12. Nulový objem (zero-volume)

Detekce zero-volume používá ray-tracing stejně jako oprava nekonzistentních orientací normál, a je tedy ovlivnitelná stejnými chybami.

Oprava zero-volume, tj. jeho smazání, je samozřejmě imunní vůči vlivu jiných chyb.

Smazání zero-volume zanechá po sobě **nevyužité vrcholy** v tabulce indexů, zruší všechny chyby (kromě nevyužitých vrcholů), které se v daném zero-volume nacházely, a pokud byl zero-volume připojen k nějakému jinému tělesu, zruší se non-manifold, pomocí kterého byl připojen (není jiný způsob jak k tělesu připojit zero-volume, než pomocí non-manifoldu).

	Vliv na detekci	Vliv na opravu
Plocha zhroucená do bodu	není možné určit, na kterou stranu paprsek dopadl	-
Plocha zhroucená do hrany	není možné určit, na kterou stranu paprsek dopadl	-
Prasklina (crack)	může dovolit paprsku projít dovnitř/ven z modelu	-
Díra	dovolí paprsku projít dovnitř/ven z modelu	-
Překrytí (overlap)	vedlejším projevem je díra dovolující paprsku projít dovnitř/ven z modelu	-

Tab. 9 – Jak mohou jiné chyby ovlivnit detekční a opravný algoritmus „zero-volume“

6.13. Duplicitní vrcholy

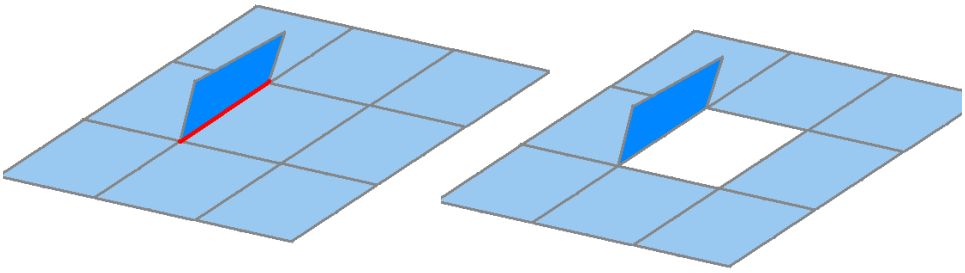
Detekce a oprava duplicitních vrcholů jsou nezávislé na přítomnosti jiných chyb.

Sjednocení indexů způsobí vytvoření **zhroucených ploch** a **nevyužitých vrcholů** a možnou přemněnu některých neidentických duplicitních ploch na **identické duplicitní plochy**.

6.14. Non-manifold

Některé non-manifoldy mohou být maskovány přítomností díry. Pokud se non-manifoldní hrana dostane na okraj díry, sníží se u ní počet ploch, které s ní sousedí. Pokud by se běžně jednalo o non-manifold hranu sousedící s 3 plochami, snížením o jednu se z ní stává běžná hrana 2-manifoldu (obr. 36). Hranové non-manifoldy tvořené větším počtem ploch než 3, nebo vrcholové non-manifoldy nejsou výskytem děr maskovány.

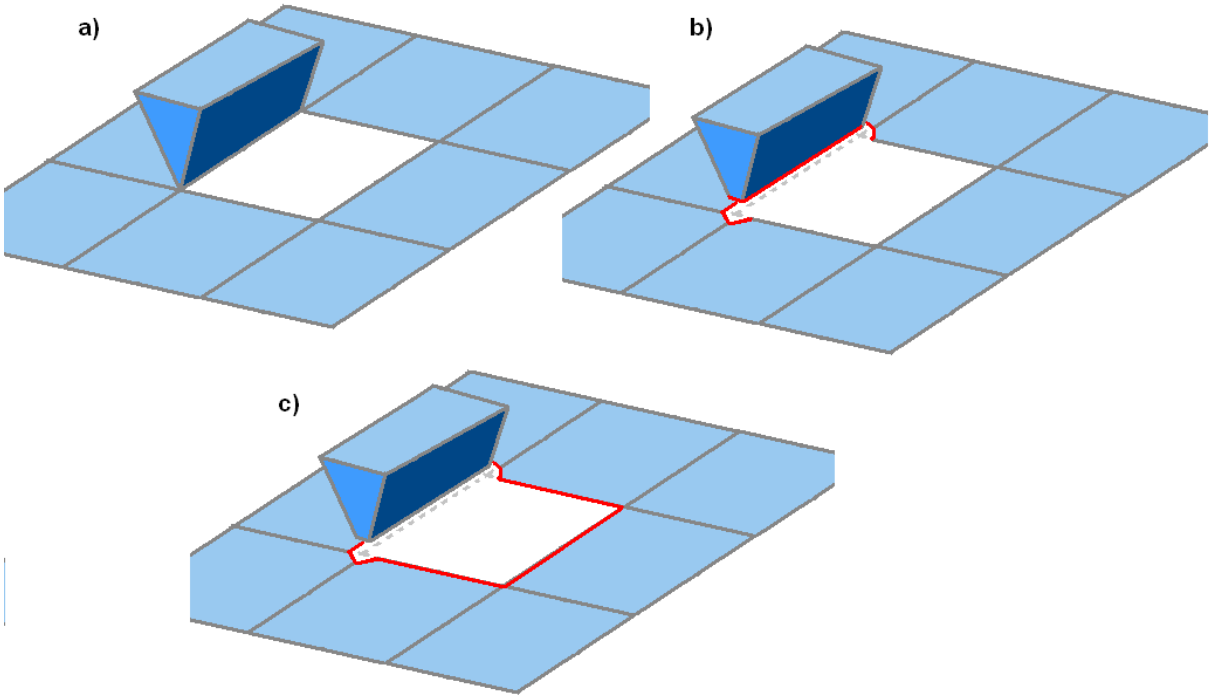
Protože crack a t-joint se tváří jako díra, tak i tyto chyby zamaskují hranový non-manifold, pokud by byl tvořen jen 3 plochami a vyskytl by se na jejich okraji.



Obr. 36 – Non-manifold zrušený výskytem díry. Vlevo původní non-manifold hrana se 3 sousedními plochami, vpravo při objevení díry (už jen se dvěma sousedy – tj. běžný 2-manifold)

Oprava non-manifoldů pomocí „*cutting & stitching*“ není výskytem děr příliš zasažená. Běžným způsobem se provede zjemnění geometrie na plochách sousedících s non-manifold hranou (nebo vrcholem) a nejbližší okolí hrany (vrcholu) se odstraní (obr. 37b). Vznikne jedna uzavřená smyčka hraničních hran, která se v závěrečné fázi algoritmu zatáhne, a jedna neuzavřená smyčka (pro koncovou fázi se používají jen hraniční hrany vytvořené algoritmem v předchozí fázi, ne hraniční hrany z jiných děr). Non-manifold je takto opraven a díra zůstává (s pozměněnou geometrií).

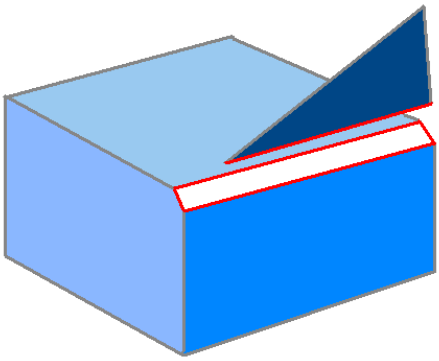
Stejným způsobem se oprava non-manifoldu zachová i v případě cracku a T-jointu.



Obr. 37 – Oprava non-manifoldu na okraji díry. a) Výchozí stav. b) „Cutting and stitching“ provedl zjemnění geometrie a odstranil plochy sousedící s non-manifold hranou (červeně jsou zvýrazněné hraniční hrany). c) Dokončení algoritmu „Cutting and stitching“ uzavřelo jedinou smyčku hraničních hran. Červeně jsou zvýrazněny nové hranice díry.

Overlap (překrytí) sám o sobě non-manifoldům nevadí. Díra, která overlap doprovází může ale stejně jako běžná díra nebo crack maskovat non-manifold s menším počtem ploch.

U zero-volume se při opravách non-manifoldů často nebudou vytvářet uzavřené smyčky. Pokud není vytvořena uzavřená smyčka, neprovádí se spojování a taková plocha pak zůstane „levitovat“ poblíž místa non-manifoldu (obr. 38).



Obr. 38 – Non-manifold a zero-volume. Opravný algoritmus již provedl zjemnění geometrie a odstranění ploch sousedící s non-manifold hranou.

	Vliv na detekci	Vliv na opravu
Prasklina (crack)	může zamaskovat non-manifold	-
T-spojení (T-joint)	může zamaskovat non-manifold	-
Díra	může zamaskovat non-manifold	-
Překrytí (overlap)	může zamaskovat non-manifold	-

Tab. 10 – Jak mohou jiné chyby ovlivnit detekční a opravný algoritmus „non-manifoldu“

6.15. Identická duplicitní plocha

Detekce této chyby není náchylná na ovlivnění. Jediným problémem jsou duplicitní vrcholy, které mají shodné souřadnice, ale liší se indexem. Detekce identických duplicitních ploch kontroluje právě indexy a tak může být tato chyba maskovaná. Takto maskované identické duplicitní plochy budou detekovatelné jako neidentické duplicitní plochy.

	Vliv na detekci	Vliv na opravu
Duplicitní vrcholy	může maskovat identické duplicitní plochy	-

Tab. 11 – Jak mohou jiné chyby ovlivnit detekční a opravný algoritmus „identických duplicitních ploch“

6.16. Neidentická duplicitní plocha

Detekce této chyby není náchylná na ovlivnění.

6.17. Průnik (Intersection)

Průnik může být částečně maskován dírou, pokud je umístěna právě v místě, kde se plochy těles protínají. Nejsme schopni detekovat protnutí na konkávní ploše a pro správnou detekci je potřeba triangulovaného modelu.

Díra (v menší míře i prasklina) umožní paprsku ray-tracingu (pokud budeme používat tuto metodu) vstoupit/vystoupit z vnitřní části tělesa a tím způsobí nejednoznačnou klasifikaci, zda-li je plocha součástí vnitřní, nebo vnější geometrie.

	Vliv na detekci	Vliv na opravu
Konkávní plocha	nemožné na ní detekovat průnik	-
Prasklina (crack)	-	může znemožnit určení vnitřní/vnější geometrie
Díra	může maskovat místo průniku	znemožní určení vnitřní/vnejší geometrie

Tab. 12 – Jak mohou jiné chyby ovlivnit detekční a opravný algoritmus „průniku“

6.18. Vnitřní (skrytá) geometrie

Detekce používá ray-tracingu a tak je citlivá na přítomnost děr.

Pokud se rozhodneme vnitřní geometrii smazat, zůstanou **nevyužité vrcholy**.

	Vliv na detekci	Vliv na opravu
Plocha zhroucená do bodu	není možné určit, na kterou stranu paprsek dopadl	-
Plocha zhroucená do hrany	není možné určit, na kterou stranu paprsek dopadl	-
Prasklina (crack)	může dovolit paprsku projít dovnitř/ven z modelu	-
Díra	dovolí paprsku projít dovnitř/ven z modelu	-
Překrytí (overlap)	vedlejším projevem je díra dovolující paprsku projít dovnitř/ven z modelu	-

Tab. 13 – Jak mohou jiné chyby ovlivnit detekční a opravný algoritmus „vnitřní geometrie“

7. Vyhodnocení

Jak vidíme, některé detekční nebo opravné algoritmy jsou citlivější, než jiné, a některé chyby během svého procesu opravy vytvoří jednu, nebo i více jiných chyb. Z obsažených informací se nyní pokusíme sestavit optimální pořadí kroků oprav povrchových mřížek, aby docházelo k minimálnímu množství maskování a generování nežádoucích chyb.

7.1. Formální chyby

Jak jsme se dozvěděli, obě zhroucené plochy (do hrany i do bodu) mohou být maskovány, pokud se v modelu vyskytnou duplicitní vrcholy, a přitom svou opravou mohou vytvářet nevyužité vrcholy. Samostatná hrana a samostatný vrchol jsou vůči maskování odolné a lze je tedy opravit gdykoliv. Jediným jejich omezením je, že svou opravou mohou vytvářet nevyužité vrcholy, tudíž by měly být opraveny ještě před opravou nevyužitých vrcholů. Protože samostatná hrana a vrchol jsou chybu na úrovni sémantiky zápisu, dají se jednoduše odchytit již při načítání modelu ze souboru a ušetříme tak čas, který by zabralo pozdější opětovné procházení všech definic ploch.

Prozatimní pořadí oprav je tedy následující:

1) samostatná hrana a vrchol (již při čtení ze souboru)
2) duplicitní vrcholy
3) zhroucené plochy
4) nevyužité vrcholy

Poslední chybou zařazené do této sekce byly konkávní plochy. Z popisu algoritmu opravy víme, že se tyto plochy triangulují společně s ostatními plochami a že se jako takové ani nedetekují. Z analýzy víme, že triangulace má problémy při výskytu duplicitních vrcholů. U triangulace nebylo zjištěno, že by některé chyby generovala, ačkoliv nejčastější zdroj chyby overlap (překrytí) je popisován jako chyba při triangulaci. Chybou při triangulaci nemusí být vždy nutně myšleno, že daný způsob triangulace vytváří takovéto chyby. Špatně umístěný vrchol je s největší pravděpodobností spíše výsledkem špatné implementace triangulovacího algoritmu. Většině algoritmů pro složitější chyby se obecně lépe pracuje s trojúhelníky, takže bychom triangulaci měli provést ještě před detekcí některé z komplexnějších chyb. Formální chyby na druhou stranu provádějí většinou jednoduché testy na všech plochách. Těm by se tedy více hodilo, pokud by množství ploch bylo po dobu jejich činnosti co nejmenší (tzn. méně testů k provedení). Prozatím můžeme konkávní plochy umístit za zhroucené plochy:

1) samostatná hrana a vrchol (již při čtení ze souboru)
2) duplicitní vrcholy
3) zhroucené plochy
4) triangulace ploch (konkávní plochy)
5) nevyužité vrcholy

7.2. Chybná spojení

Tato skupina chyb se ukázala jako nejcitlivější na selhání při výskytu některých jiných chyb.

Crack i T-joint potřebují dosti aktivně triangulovat jednu, nebo více ze svých okolních ploch. Analýza vysvětlila, jak by mohla plocha zhroucená do hrany znemožnit provedení potřebné triangulace. Logicky tedy budeme crack i t-joint opravovat až po zhroucených plochách.

Crack pravidelně vytváří nevyužité vrcholy, které tak zůstanou jako poslední krok.

Protože detekce cracků má tendenci označovat t-jointy jako cracky, bylo by vhodné zařídit, aby byl v době oprav cracků model již bez T-jointů.

Speciální případy cracků ukázaly v analýze nízkou odolnost vůči non-manifoldům a všem chybám, které mohou mít non-manifold jako vedlejší produkt.

Ke crackům a t-jointů patří ještě i díry. Ty mají vůči non-manifoldům stejné slabiny. Algoritmus detekce děr je výchozím bodem pro detekci cracků a T-jointů a je možné ji provést pro všechny 3 chyby společně. Protože opravný algoritmus děr opraví jakékoliv přítomné t-jointy a cracky jako by se jednalo o běžné díry, budeme je muset vyřešit mezi detekcí děr a opravou děr.

Průběžné pořadí kroků tak nyní máme:

1) samostatná hrana a vrchol (již při čtení ze souboru)
2) duplicitní vrcholy
3) zhroucené plochy
4) triangulace ploch (konkávní plochy)
5) non-manifold, duplicitní plochy, překrytí (overlap)
6) detekce děr
7) t-jointy
8) cracky
9) oprava děr
10) nevyužité vrcholy

Další v přehledu chyb je nekonzistentní orientace normál. Detekční algoritmus je velmi citlivý na přítomnost díry a vyžaduje aby byl model uzavřený. Má sice zvýšenou odolnost proti crackům, ty se však stejně řeší ještě před dírami.

Jinou chybou využívající ke své detekci nebo opravě ray-tracingu, je zero-volume. Podobným způsobem, jakým se spojily detekce cracku, t-jointu a díry, by se dal spojit do jednoho průchodu (nebo alespoň do co nejmenšího počtu) i raytracing.

7.3. Duplicitní geometrie

Detekce a opravy non-manifoldů ukázaly svou velkou robustnost. Algoritmus *cutting & stitching* dokáže bez velkých problémů zlikvidovat non-manifold prostým smazáním všeho, co s ním sousedí. Jeho nevýhodou je zjemňování ploch, které s non-manifoldem sousedí. I když nutnosti opravovat non-manifoldy se nezbavíme, můžeme se vyhnout nutnosti opravovat ty non-manifoldy, které jsou vedlejším produktem jiné chyby. Opravou překryvů (overlap) a duplicitních ploch, eliminujeme non-manifoldy, které existovaly jen jako jejich doprovodný efekt.

Současné pořadí kroků prozatím dostáváme následující:

1) samostatná hrana a vrchol (již při čtení ze souboru)
2) duplicitní vrcholy
3) zhroucené plochy
4) triangulace ploch (konkávní plochy)
5) duplicitní plochy, překrytí (overlap)
6) non-manifold
7) detekce děr
8) t-jointy
9) cracky
10) oprava děr
11) orientace normál, zero-volume
12) nevyužité vrcholy

Podíváme-li se blíže na duplicitní plochy, zjistíme, že identické duplicitní plochy jsou detekovány jen podle shodnosti indexů jimi referencovaných vrcholů, a při jejich detekci je efektivnější pracovat s menším počtem ploch, než s větším počtem získaným triangulací. Naproti tomu neidentické duplicitní plochy již vyžadují triangulovaný model, jelikož jejich detekce je založena na výpočtu průniku dvou trojúhelníků. Zde se nabízí zavést pořadí:

- oprava identických duplicitních ploch
- triangulace ploch (včetně konkávních)
- oprava neidentických duplicitních ploch a překryvů (overlapů)

Překryvy (overlapy) se od neidentických duplicitních ploch liší jen tím, že plocha jejich trojúhelníku nemusí být zcela duplicitní, ale některými svými částmi může pokrývat oblast, kterou žádný jiný trojúhelník nepokrývá. Vzhledem k totožnému zacházení s nalezenými overlapy a nalezenými neidentickými duplicitními plochami nám stačí používat pouze obecnější detekci overlapu (tj. hledání jakéhokoliv překrytí, a nezabývat se kontrolou zda-li se jedná o překrytí částečné, nebo úplné).

Posledními dvěmi chybami v našem seznamu jsou vnitřní geometrie a průniky (intersection). Detekce vnitřní geometrie používá ray-tracing, stejně jako zpracování normál a detekce zero-volume, proto by bylo výhodné pokusit se najít spojené řešení těchto tří chyb.

Oprava průniku (intersection) využívá ray-tracing okrajově. Mění geometrii modelu a výsledky ray-tracingu se tak stávají nevalidními.

Mazání vnitřní geometrie se tak stává poslední položkou, která v průběhu řetězce oprav maže některé vrcholy a má tak šanci na zanechání nevyužitých vrcholů v tabulce indexů. Oprava nevyužitých vrcholů a s tím spojené přeindexování vrcholů modelu se tak provede jen jednou, s minimálním rizikem zavlečení a rozšíření chyb.

7.4. Výsledné pořadí oprav

Po analýze vzájemných vlivů a shrnutí získaných poznatků dostáváme následující výsledné pořadí kroků oprav:

1) Odfiltrování ploch definovaných jen jedním nebo dvěma vrcholy již během načítání ze souboru
2) Vyhledání vrcholů s odlišným indexem, ale shodnými, nebo velice podobnými souřadnicemi a jejich sloučení pod společný index
3) Vyhledání a odstranění zdegenerovaných ploch (ploch s nulovým obsahem)
4) Vyhledání a odstranění identických duplicitních ploch
5) Triangulace polygonálních ploch
6) Nalezení a odstranění překrývajících se trojúhelníků (overlap)
7) Nalezení non-manifoldních hran a vrcholů a provedení jejich opravy
8) Nalezení okrajů děr
9) Identifikace a oprava t-spojení (děr s nulovou plochou)
10) Identifikace a oprava cracků
11) Oprava všech zbývajících děr
12) Nalezení a opravení průniků
13) Pomocí ray-tracingu metodou vrstev určení vnější-vnitřní orientace ploch
14) Podle vnitřní-vnější orientace identifikování a odstranění zero-volume
15) Oprava orientace normál podle výsledků vnitřní-vnější orientace
16) Podle detekovaných vrstev (z ray-tracingu) identifikace a odstranění skryté geometrie
17) Nalezení nevyužitých vrcholů a potřebná reindexace

8. Závěr

Analyzováním vzájemných vlivů různých chyb na jednotlivé detekční a opravné algoritmy jsme se úspěšně dopracovali k určení optimálního pořadí oprav povrchových mřížek. Důraz byl kladen na možnosti maskování chyb a na chyby vytvářené danými algoritmy jako vedlejší efekt. Snažili jsme se nalézt takové řešení, ve kterém by nedocházelo k žádnému maskování, a kde by počet vytvořených vedlejších chyb byl minimální.

Podařilo se nám shrnout seznam chyb, které se mohou v povrchové mřížce vyskytnout, pro každou zvolit, případně vytvořit nebo modifikovat algoritmus pro detekci a pro opravu dané chyby, a nakonec nalézt pořadí oprav, které se vyhýbá možným maskování chyb navzájem, a které používá sdílenou detekci společných rysů, namísto zcela individuální opakované detekce prováděné pro všechny chyby zvlášť, bez ohledu na jejich podobnost.

Předmětem pokračování této práce by mohla být implementace detekčních a opravných algoritmů do společného prostředí, a následná implementace řetězce oprav odpovídající výsledkům bádání této práce, za účelem testování kvality navrhovaného pořadí. Dále by mohlo být předmětem pokračování srovnávací testování variací navrhovaného pořadí oprav.

Navrhované řešení je jedno z možných, jelikož odolnost některých typů chyb vůči maskování jinými chybami je dostatečně velká, aby dala prostor určité variabilitě. Jen u některých chyb je pořadí oprav dáno zcela jednoznačně, zatím co určité množství z navržených kroků je z pohledu provedené analýzy zaměnitelných. Testování variability, rychlosti, odolnosti a spolehlivosti konkrétních pořadí by mohlo být předmětem budoucího bádání.

Algoritmy použité pro detekci a opravu jednotlivých chyb jsou vybrány z mnoha, které jsou k dispozici. Některé algoritmy jsou upravené algoritmy z jiných chyb, které se zdály být dostatečně silné nebo efektivní pro použití. Při použití jiných algoritmů pro detekci nebo opravu některých chyb může být optimální pořadí kroků oprav odlišné.

9. Seznam použité literatury

[1] – Daniel Veleba, **Oprava nekonzistentních povrchových sítí,**
Diplomová práce, FEL ČVUT Praha, Květen 2008

[2] – Tao Ju, **Fixing Geometric Errors on Polygonal Models: A Survey**,
Journal of Computer Science and Technology, 24(1):19-29, January 2009

[3] – Tao Ju, **Robust Repair of Polygonal Models**,
Proceedings of ACM SIGGRAPH, 2004 ACM Transactions on Graphics,
23(3):888-895, August 2004

[4] – Kaichi Zhou, Eugene Zhang, Jirí Bittner, Peter Wonka,
Visibility-driven Mesh Analysis and Visualization through Graph Cuts,
IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol. 14, no. 6,
pp. 1667-1674, Nov/Dec, 2008

[5] – Marco Attene, **A lightweight approach to repairing digitized polygon meshes**,
The Visual Computer, 2010 (to appear). February 2010

[6] – André Guéziec, Gabriel Taubin, Francis Lazarus, Bill Horn,
Cutting and Stitching: Converting Sets of Polygons to Manifold Surfaces,
IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, April 2001

[7] – Thomas Akenine-Möller, Eric Haines, Naty Hoffman, **Real-Time rendering**,
A K Peters, Ltd., 3rd edition, Wellesley, Massachusetts, 2008,
ISBN-13: 978-1-56881-424-7