

# Efekti zakrivljenosti regiona geometrije 3D modela na simplifikaciju topološke strukture

Bata Vasić, *Elektronski fakultet u Nišu* i Vlastimir D. Pavlović, *Elektronski fakultet u Nišu*,

**Sadržaj** — Razvojem internet tehnologija i povećanjem brzina prenosa podataka, upotreba visokokvalitetnih multimedijalnih sadržaja koji uključuju trodimenzionalne (3D) modele i animirane sekvence, postaje masovna. Ovaj rad analizira otpornosti geometrijske strukture 3D modela na proces simplifikacije upoređujući odnos invarijantnosti regiona grubih i glatkih površina. Rezultati analize topoloških degradacija i degeneracija po kriterijumima zakrivljenosti regiona, pokazuju da su grubi regioni trodimenzionalnog modela pogodniji za nošenje i čuvanje informacija.

**Ključne reči** — Kompjuterska animacija, 3D modeli, kompresija 3D modela, geometrijska zakrivljenost 3D regiona, invarijantnost grubih regiona, otpornost na simplifikaciju.

## I. UVOD

Pristupi kreatora i distributera multimedijalnih sadržaja menjaju se sa razvojem tehnologija i potrebama korisnika i industrije. Trodimenzionalni (3D) objekti postaju aktuelni širenjem njihovog spektra upotrebe. Video igre su bazirane isključivo na 3D grafici i njihovi korisnici predstavljaju najširu grupaciju eksplatora 3D modela. Sa druge strane povećava se upotreba kompjuterske animacije u građevinsko arhitektonskoj industriji i medicinskim simulacijama. Jednom rečju sve veći broj "običnih" ljudi ulazi u biznis modelovanja, animacije i trgovine 3D modelima.

Problemi smanjivanja količine podataka trodimenzionalnih vektorskih modela leže upravo u relativnoj jednostavnosti zapisa u odnosu na priličnu "savršenost" kompresivnih alata za 2D digitalne fotografije, pa i audio zapise. Evidentne su razlike upotrebljenih procesa komprimovanja i obrade digitalnih fotografija, video sekvenci, dokumenata i audio fajlova u odnosu na 3D modele [1], ali su zahtevi koji moraju biti ispunjeni identični za sve oblike multimedijalnog sadržaja. Specifičnost logike trodimenzionalno predstavljenih modela ipak zahteva poseban pristup analizi optimizacije i njenih negativnih efekata na topološku strukturu geometrije 3D modela.

Ovaj rad se bavi analizom struktura regiona i upoređivanjem invarijantnosti osnovnih elemenata geometrije čvorova i površina. Takođe analiziramo

geometrijske strukture regiona i posledice upotrebe algoritma simplifikacije. Rad ujedno daje i precizne uporedne podatke o stepenu degradacija navedenih regiona i elemenata, izvlačeći veoma važne zaključke koji će dati veliki doprinos svim dosadašnjim istraživanjima u ovoj oblasti i postaviti smernice daljih aktivnosti i analiza.

Rad je organizovan na sledeći način. U odeljku 2 ćemo ukratko pomenuti prethodna dostignuća istraživanja, kao opis zapisa podataka kod 3D objekata, dok će se odeljak 3 baviti analizom u odnosu na postavljene pretpostavke. Na kraju, odeljak 4 iznosi zaključke istraživanja, razmatranjem postignutih rezultata.

## II. RELEVANTNA ISTRAŽIVANJA

U poređenju sa audio, video, slikovnim i tekstualnim zapisima, njihovim metodama obrade i kompresije, 3D model se suočava sa nekim specifičnim problemima [1]:

- Rukovanje i editovanje može da podrazumeva razne kompleksne geometrijske ili topološke operacije. Modelerima su, za ovu namenu, na raspolaganju različite vrste alata.

- Ne postoji jedinstven način predstavljanja modela podataka. Mreža koja je sačinjena od različitih tačaka, ivica i površina može predstavljati površinu modela, a temena mogu biti nasumično pomerana za relativno velike vrednosti bez degradiranja ukupnog vizualnog kvaliteta.

- Nema implicitnog redosleda podataka. Audio i video podaci su, na primer, sekvencirani u vremenskim serijama. Podaci u digitalnim fotografijama i video frejmovima (pikselima) su poređani po skeniranim linijama. Podaci modela kao što su temena, ivice i površine, međutim, mogu biti poređani, ali se zahteva najmanje fiksna orijentacija i eventualno pozicija podataka u prostoru.

Ostali problemi su slični problemima kod standardnih tipova medija. Proces optimizacije će, na primer, sigurno promeniti podatke 3D modela. Da bi se postigla adekvatna brzina renderinga, broj površina tj. podataka mora biti redukovano pojednostavljuvanjem modela što podseća na fotografije podvrgnute talasnim ili JPEG (Joint Photographic Experts Group) transformacijama, ili video i audio sekvence komprimovane MPEG (Moving Picture Experts Group) algoritmom.

Analize kompresije, optimizacije i transformacije 3D geometrijskih modela su relativno novi pravci u istraživanjima, te su praktično osnovni pravci preneseni iz istraživanja ostalih multimedijalnih sadržaja. Iz ranije objavljenih radova iz oblasti digitalnog 3D procesiranja datih u [1] i [2], mogu se uočiti glavni pravci i tehnike čiji će se principi preneti na sve ostale oblasti obrade 3D objekata, sve do *watermarkinga* i zaštite. Jedna od bitnijih kategorizacija otpornosti (invarijantnosti) pojedinih

Bata Vasić, Elektronski fakultet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Republika Srbija (telefon: +381-63-417-696, e-mail: bata.vasic@elfak.ni.ac.rs).

Vlastimir D. Pavlovic, Elektronski fakultet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, P.O. Box 73, 18000 Niš, Republika Srbija; (e-mail: vlastimir.pavlovic@elfak.ni.ac.rs).

geometrijskih primitiva u odnosu na razne transformacije i modifikacije daje smernice u izboru načina pristupa analizama:

- Sve dole pomenute transformacije utiču na koordinate tačaka
- Invarijantan za translaciju i rotaciju: dužina linije, polje poligona i zapremina polihedrona
- Translacija, uniformno skaliranje i rotacija ne utiču na: dve vrednosti koje definišu set sličnih trouglova, na pr. dva ugla i odnos oblasti dva poligona
- Invarijantan na affine transformacije: odnos dužina dva segmenta prave linije i odnos zapremine dva polihedrona
- Invarijantan na transformacije projekcije je unakrsni odnos četiri tačke na pravoj liniji

Zaključićemo na osnovu nabrojanog da je preporučljivo koristiti informacije koje nose koordinate tačaka i čvorova, naravno pod uslovom da je način izračunavanja invarijantan na određene transformacije.

### III. NOVI PRISTUP ANALIZI INVARIJANTNOSTI 3D MODELA

Da bismo razumeli proces optimizacije, izvešćemo neke neophodne matematičke formulacije bez upuštanja u analize algoritama optimizacija i simplifikacija. Ovo će biti dovoljno za eksperimentalno dokazivanje invarijantnosti na pomenute procese.

#### A. Osvrt na principe optimizacije

Početak analize podrazumeva razumevanje principa najčešće korišćenih funkcija od strane korisnika ili samih alata za konverziju 3D formata. To su pre svega algoritmi za optimizaciju *Mesh Optimization* [3], *Progressive Meshes* [4], *Simplification Envelopes v1.1* [5], *JADE v2.1* [6] i *QSlim v2.0b* [7], koji drastično utiču na topologiju geometrijske strukture pomerajući i brišući ili dodajući čvorove, rotirajući i deformišući trouglove i poligone. Zato ćemo uz korišćenje terminologije iz [3] generalizovati suštinu dejstva procesa optimizacije kao formiranje novog meš (mrežnog) objekta koji se dobro uklapa u set tačaka  $X$  i ima mali broj čvorova. Nađimo simplifikujući kompleks  $K$  i set pozicija čvorova  $V$  definišući meš  $M = (K, V)$  koji minimizuje energetska funkciju:

$$E(K, V) = E_{dist}(K, V) + E_{rep}(K) + E_{spring}(K, V)$$

Prva dva uslova odgovaraju dvoma navedenim ciljevima, a treći je dat u nastavku. Energetska distanca  $E_{dist}$  jednaka je zbiru kvadrata rastojanja između tačaka  $X + \{x_1, \dots, x_n\}$  i meša.

$$E_{dist}(K, V) = \sum_{i=1}^n d^2(x_i, \phi_V(|K|))$$

Energetska zastupljenost sankcioniše meš sa velikim brojem čvorova. Ona je postavljena tako da bude proporcionalna broju čvorova  $m$  od  $K$ :

$$E_{rep}(K) = c_{rep}m$$

Optimizacija omogućava čvorovima da budu dodati ili uklonjeni iz meša. Kada je čvor dodat energetska distanca  $E_{dist}$  će verovatno biti redukovana. Uslov  $E_{rep}$  čini da operacija snosi posledice kazne, tako da čvorovi nisu dodati privremeno. Slično tome, težnja je da se uklone čvorovi iz guste mreže meša iako se  $E_{dist}$  blago povećava.

U tom slučaju  $E_{rep}$  deluje da podstakne uklanjanje čvorova. Parametar koji definiše korisnik  $c_{rep}$  omogućava kontrolisani kompromis između preciznosti geometrijskog poklapanja i štedljivosti reprezentovanja. Ipak minimizacija  $E_{dist} + E_{rep}$  ne daje željene rezultate jer se javlja fundamentalni problem ukoliko minimum  $E_{dist} + E_{rep}$  možda ne postoji. Da bi minimum postojao, dodajemo treći uslov  $E_{spring}$ . On na svaku ivicu postavlja oprugu ostatka nulte dužine i konstantu elastičnosti  $k$ :

$$E_{spring}(K, V) = \sum_{\{j,k\} \in K} k \|v_j - v_k\|^2$$

Naglašavamo da nam nije namera da kažnjavamo oštre dihedralne uglove meša energijom opruge, jer takve karakteristike mogu biti prisutne u osnovnoj površini i trebale bi biti obnovljene, već vidimo  $E_{spring}$  kao regulator koji pomaže vođenje optimizacije do željenog lokalnog minimuma. Kako optimizacija konvergira ka rešenju magnituda  $E_{spring}$  se može postepeno smanjivati.

Nakon ovih razmatranja izvucimo samo visoko rizične geometrijske primitive u smislu destrukcije strukture geometrijskog modela pod uticajem prethodno opisanih procesa:

- Čvorovi samostalni u prostoru ili imaju samo jednu graničnu ivicu,
- Ivice koje su zajedničke za više od dve površine
- Čvorovi koji imaju najviše suseda (imaju zajedničku ivicu sa najvećim brojem čvorova),
- Čvorovi koji spajaju kolinearne ivice,
- Površine čije je teme čvor, naveden u prvoj tvrdnji.
- Čvorovi koji sa susedima grade tup ugao (sa susedima grade malu zakrivljenost).

Navedeni uslovi će nadalje biti korišćeni u analizi kao ključne teme i uzorci ispitivanja i merenja.

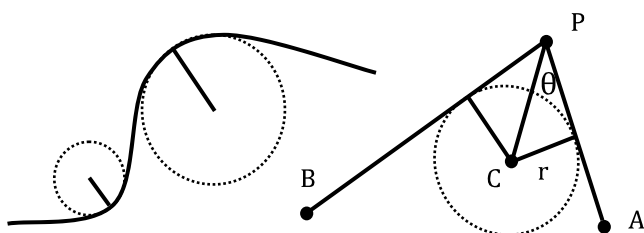
#### B. Izbor jednoznačnog formata 3D modela i nosioca informacije

3D model je definisan pozicijom čvorova i površina, a sve između je prazan prostor koji je samo virtuelnim spajanjem tačaka prikazan korisniku aplikacija kao čvrsto telo. Ovo nam praktično daje neograničene mogućnosti analize tačaka u prostornom domenu. U ovom radu korišćićemo OBJ (Wavefront Technologies - open file format) prikaz 3D geometrije modela zbog jednostavnosti prikaza korišćenjem liste vrednosti čvorova i površina. (R. Ohbuchi [1] koristi VRML - Virtual Reality Modeling Language [8] u svojim istraživanjima).

#### C. Predstavljanje zakrivljenosti i izračunavanje

Kontrast na digitalnoj fotografiji, oštri tonski prelazi u audio signalima, kao i drastične promene kadrova u videu nose najviše informacija u zapisima pomenutih digitalnih media. Analogno tome, grubost regiona, tj. velika rastojanja ili rotacije čvorova u odnosu na susede i njihove normale kod 3D modela su ključni nosioci korisnih informacija.

Zakrivljenost regiona se može predstaviti upotrebom definicije zakrivljenosti iz diferencijalne geometrije "Poluprečnik najveće sfere koja se može upisati u zakrivljeniju stranu površine u datoj tački odvajanja od površine na način na koji se površina zakrivljuje" [9]:



Sl.1. Poluprečnik krivine u ravni (levo) i aproksimacija zakrivljenosti u ravni preko čvorova (desno) [9].

Sl. 1. predstavlja dvodimenzionalnu verziju procene zakrivljenosti kod tačke  $P$ . Ovdje je kružnica nacrtana tako da joj je tangenta duž  $PA$  na svojoj sredini i da joj je duži krak  $PB$  takođe tangenta. Poluprečnik te kružnice je  $r = \tan(\theta) |P - A|/2$ . Na ovoj slici duž  $PC$  polovi ugao  $\angle APB$ . Ova slika će imati ulogu polazne tačke u aproksimaciji zakrivljenosti poligonalnih površina u 3 ravni u tački  $P$ .

U trodimenzionalnom slučaju, duž  $PC$  je aproksimirana normalom površine u čvoru  $P$ . Tada se svaka ivica poligonalnog meša, koja spaja čvor  $P$  sa drugim čvorom  $Q_i$ , razmatra, i može se izračunati procena poluprečnika zakrivljenosti iz svake od  $n$  ivica  $PQ_1, PQ_2, \dots, PQ_n$ . Neka je  $V$  normalizovana verzija vektora  $Q_i - P$ , to jest jedinični vektor paralelan ivici  $PQ_i$ , onda je procena za  $\theta_i$ ,  $\cos^{-1}(N * V)$ , a poluprečnik procene za ivicu  $PQ_i$  je  $r_i = \tan(\theta_i) |P - Q_i|/2$ . Ova finalna procena  $r$  minimalnog poluprečnika zakrivljenosti u čvoru  $P$  je minimum svih  $r_i$ . Procenu možemo poboljšati usrednjavanjem poluprečnika čvora  $r$  sa poluprečnicima svih susednih čvorova i uzeti to za minimalni poluprečnik zakrivljenosti u čvoru.

Napominjemo da smo algoritme za izračunavanje zakrivljenosti date u [15] i [16] koristili jedino za selekciju čvorova, dok su ostali podaci dobijeni korišćenjem alata simplifikacije u aplikaciji. Ovo je važno jer se najčešće degradacije dešavaju od strane korisnika aplikacija.

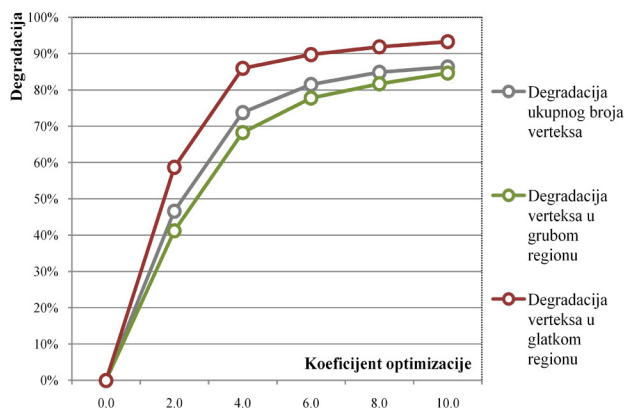
#### D. Rezultati

Kroz dijagrame, tabele i slike pokazaćemo rezultate merenja i izračunati međusobne numeričke relacije svih degradacija pod dejstvom procesa simplifikacije geometrijske strukture modela ljudske glave generisane u korisničkoj 3D aplikaciji.

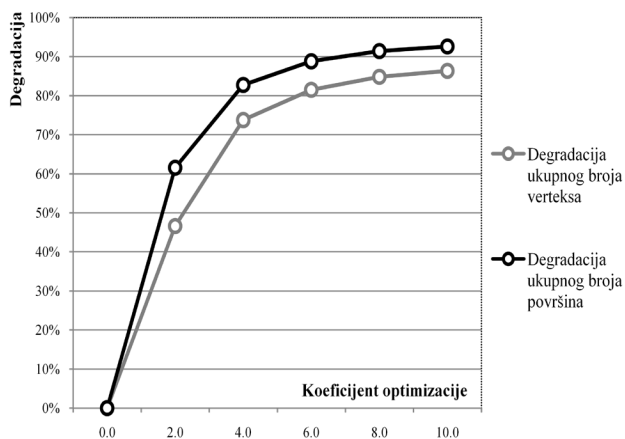
TABELA 1: EKSPERIMENTELNO IZMERENE VREDNOSTI BROJA ČVOROVA I POVRŠINA PO REGIONIMA 3D MODELA U ZAVISNOSTI OD KOEFICIJENTA (FACE TRESHOLD) SIMPLIFIKACIJE.

FT	Grubi region		Degradacija u GRR (%)		Glatki region		Degradacija u GLR (%)	
	Č	P	Č	P	Č	P	Č	P
0.0	37520	73808	0%	0%	16,802	65,163	0%	0%
2.0	22056	44325	41%	39%	6,935	9,075	58%	86%
4.0	11890	19478	68%	73%	2,353	4,439	86%	93%
6.0	8320	12350	77%	83%	1,719	3,163	89%	95%
8.0	6859	8659	81%	88%	1,359	3,215	91%	95%
10.0	5746	6215	84%	91%	1,123	2,980	93%	95%

Tabela sa eksperimentalno izmerenim vrednostima pokazuje procentualne degradacije čvorova i površina u pojedinačnim regionima u odnosu na povećanje vrednosti optimizacionog površinskog praga FT (Face Treshold).



Sl. 2. Odnosi procenata degradacije čvorova u pojedinačnim regionima u odnosu na povećanje vrednosti FT prilikom simplifikacije.



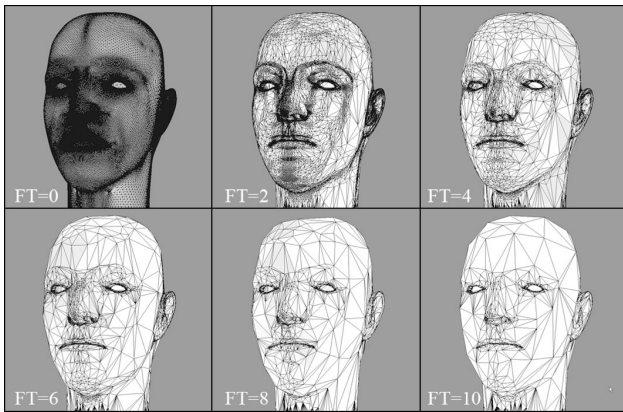
Sl. 3. Odnosi degradacija čvorova i površina za različite vrednosti FT prilikom simplifikacije.

Tabela i na osnovu nje iscrtan grafikon dokazuju očigledno manji procenat degradacije modela u grubom regionu od degradacije u regionu glatkih površina. Za početne vrednosti FT pokazuje se približno 20% viška degradacije čvorova i čak preko 40% viška u degradaciji površina glatkih regiona (GLR) u odnosu na grube (GRR).

Takođe zaključujemo da funkcija degradacije glatkih čvorova nije linearna i da je drastično povoljnije korišćenje čvorova za podatke iz grubih nego onih iz glatkih regiona, a naročito za manje vrednosti praga simplifikacije kada je procenat degradacije čvorova u grubom regionu duplo manji od onog u glatkom, pa je i verovatnoća očuvanja podataka i informacije duplo veća.

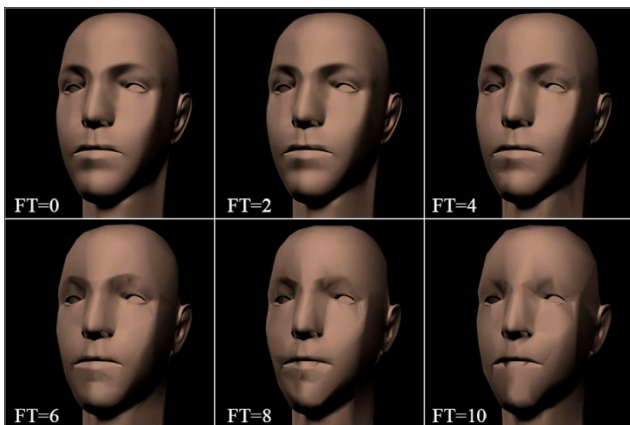
Pomenimo i to da je selektovanje čvorova i površina 3D modela rađeno pomoću Matlab algoritma koji smo pomenuli, uz slučajni izbor koeficijenta buhvatanja, tj koeficijent praga selekcije, što je dovelo do rada sa primitivama određene granične zakrivljenosti. Manja granica selekcije uzrokuje smanjenje broja selektovanih čvorova, ali su oni "zakrivljeniji", te je vrednosti razlika degradacije u regionima veća.

Za veće vrednosti simplifikacije, gubi se geometrijska ali i vizuelna prepoznatljivost 3D modela. Na sledećim slikama ćemo to i pokazati.



Sl. 4. Žičani prikaz strukturalne degradacije geometrije 3D modela primene simplifikacije.

Rezultati degradacije su jasno vidljivi, ali je takođe i vizuelno veoma primetan manji stepen pretumbacije čvorova i površina na delovima nosa, usana i obrva u odnosu na izobličenja strukture obraza, čela i brade. Upravo su navedeni regioni nosa, usana i obrva regioni sa najvećim neravninama. Tačan odnos degradacije čvorova po regionima dat je u prethodnoj tabeli, a vizuelnu degradaciju prikazujemo na sledećoj slici.



Sl. 5. Vizuelna degradacija 3D modela za različite vrednosti FT prilikom simplifikacije - Rendering

#### IV. DISKUSIJA I BUDUĆI RAD

Analiza je jasno pokazala da je deo informacije koje nose zakrivljene linije, nasuprot lako vidljivim, relativno ravnim površinama 3D modela, mnogo veća. Ona istovremeno pokazuje i koncentraciju informacije, ali na neki način i energetsku vrednost upoređenih regiona i primitiva od kojih su sadržani.

Rezultati analize su saglasni eksperimentima iz [10], koji takođe pokazuju da su istaknuti regioni modela [11] prilično otporni na dosta velika pojednostavljenja teksture i geometrije modela sa jedne strane, odnosno da je ljudsko oko manje osetljivo na promene neravnih (grubljih) površina u odnosu na promene glatkih [12].

Eksperimentalno smo dokazali i veću invarijantnosti čvorova u odnosu na površine, kao i veći stepen invarijantnosti čvorova u gubljim u odnosu na čvorove u glatkim regionima.

Za razliku od strukture podataka slika, audio i video zapisa 3D vektorski formati imaju topološku strukturu zasnovanu na oblicima, ravnim i krivim površinama, tačkama i ivicama, udubljenjima i ispučenjima. Zbog

toga su od realnog značaja rezultati istraživanja iz ovog rada, a uticaj različitosti analiziranih modela biće tema budućih radova. Bilo bi zanimljivo pokazati da je položaj čvorova u optimizaciji uvek pod uticajem strukture ili suštine modela i da kao takav ne mora nositi uvek istu količinu informacija. Bilo bi takođe interesantno staviti ovu oblast u kontekst šire oblasti *watermarkinga* i zaštite podataka u geometrijskoj strukturi 3D modela.

#### LITERATURA

- [1] R. Ohbuchi, H. Masuda and N. Aono, "Watermarking Three-Dimensional Polygonal Models," in *Proc. ACM Multimedia 97*, ACM Press, New York, pp. 261-272, 1997.
- [2] O. Benedens, "Geometry-Based Watermarking of 3D Models," *IEEE CG&A*, Vol. 19, No. 1, pp. 46-55, 1999.
- [3] H. Hoppe, T. DeRose, T. Duchamp, J. McDonald and W. Stuetzle, "Mesh Optimization," in *Proc. SIGGRAPH 93*, ACM SIGGRAPH, pp. 19-26, 1993.
- [4] H. Hoppe, "Progressive Meshes," in *Proc. SIGGRAPH 96*, ACM SIGGRAPH, pp. 99-108, 1996.
- [5] J. Cohen, D. Manocha and M. Olano, "Simplifying Polygonal Models Using Successive Mappings," in *Proc. Visualization '97*, IEEE Computer Soc. Press, Oct. 1997, pp. 395-402.
- [6] M. Garland and P.S. Heckbert, "Surface Simplification using Quadric Error Metrics," in *Proc. SIGGRAPH 97*, ACM SIGGRAPH, pp. 209-216, 1997.
- [7] P. Lindstrom and G. Turk, "Fast and Memory Efficient Polygonal Simplification," in *Proc. Visualization '98*, IEEE Computer Soc. Press, pp. 279-286, 1998.
- [8] G. Bell, R. Carey and C. Marrin, *The Virtual Reality Modeling Language, VRML Version 2.0*, ISO/IEC WD 14772, 1996.
- [9] G. Turk, "Re-Tiling Polygonal Surfaces," in *Proc SIGGRAPH 92*, ACM SIGGRAPH Computer Graphics, Vol. 26, No. 2, pp. 55-64, 1992.
- [10] W. Bender, D. Gruhl, N. Morimoto and A. Lu, "Techniques for data hiding," *IBM Syst. J.*, vol. 35, nos. 3 and 4, pp. 313-336, 1996.
- [11] C.H. Lee, A. Varshney and D. W. Jacobs, "Mesh saliency," *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 24, No. 3, pp. 659-666, 2005.
- [12] B. Yang, X. Wang and F. Li, "Salient Region of Textured 3D Model," in *Proc Pacific Graphics*, pp.78-84, 2010.
- [13] K. Kim, M. Barni and H.Z. Tan, "Roughness-Adaptive 3-D Watermarking Based on Masking Effect of Surface Roughness," *IEEE transactions on information forensics and security*, Vol. 5, No. 4, 2010.
- [14] G. Taubin, "Geometric Compression Through Topological Surgery," *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 17, No. 2, pp. 84-115, 1998.
- [15] D. Cohen-Steiner and J-M. Morvan, "Restricted Delaunay triangulations and normal cycle," In *Proc. 19th Annual ACM Symposium on Computational Geometry*, ACM Press, p. 312-321, 2003.
- [16] P. Alliez, D. Cohen-Steiner, O. Devillers, B. LeŽvy and M. Desbrun, "Anisotropic Polygonal Remeshing," in *Proc ACM Transactions on Graphics, SIGGRAPH '03*, Vol. 22, No 3, 2003.

#### ABSTRACT

The development of internet technology and increasing data transfer speed increasing also a mass use of high-quality multimedia contents that include three-dimensional (3D) models and animated sequences. This paper analyzes the resistance of the 3D model geometric structure simplification by comparing the invariance ratio of the rough and smooth surfaces regions. The results on topological degradation and degeneration of the region curvature criteria shows that the rough regions of three-dimensional models are more suitable for carrying and storing information.

#### EFFECTS OF THE 3D MODEL GEOMETRIC REGION CURVATURE TO A TOPOLOGICAL STRUCTURE SIMPLIFICATION

Bata Vasic and Vlastimir D. Pavlovic