

Slepi robusni vodeni žigovi 3D mreža

Bata Vasić, Goran T. Đorđević i Bane Vasić, *Fellow IEEE*

Sadržaj — Ovaj rad diskutuje osobine novog metoda robusnog skrivanja kodovane informacije slepog vodenog žiga u geometrijskoj strukturi trodimenzionalnog (3D) mrežnog modela. Negativni uticaj procesa optimizacije mreže na postojanost informacije vodenog žiga rešen je kombinacijom upotrebe algoritma za biranje pouzdanih tačaka i primene kodova za ispravljanje grešaka, nastalih brisanjem čvorova mreže u kojima su biti vodenog žiga sakriveni. Na osnovu geometrijskih kriterijuma algoritam bira temena mreže čija je verovatnoća brisanja prilikom pojednostavljenja mreže najmanja, posle čega se u izabrana temena kvantizacijom upisuje kodovana informacija vodenog žiga. Ekstrakcijom i dekodovanjem dobijene informacije izdvaja se ugrađeni vodeni žig.

Ključne reči — 3-D model, geometrijska 3D mreža, ispravljanje grešaka, kvantizacija, vodeni žig.

I. UVOD

VODENI žigovi zauzimaju važno mesto u zaštiti multimedijalnih sadržaja od neovlašćene upotrebe jer efikasno pružaju informaciju o vlasništvu ili autorstvu pomenutih sadržaja. Poslednje decenije je došlo do revolucije upotrebe trodimenzionalnih (3D) objekata pa su intenzivirana i istraživanja u oblasti njihove obrade, kompresije i zaštite. Najskorija rešenja u sferi medicinskih i arheoloških simulacija, arhitektonskih vizualizacija, a naročito kompjuterskih igara i aplikacija za Android i iPhone platforme ukazuju na velike mogućnosti kompjuterski generisanih 3D modela. Stalno povećanje brzina protoka bežičnih mobilnih tehnologija i Interneta omasovljuje korišćenje autorskih modela, što istovremeno uzrokuje opasnost od zloupotreba. Međutim, rast brzina prenosa ne uspeva da prati ogromnu popularnost ovakvih aplikacija i tako jednostavnost 3D modela definiše kao njihov primarni zahtev.

Pojednostavljenje 3D meševa uključuje kompleksne geometrijske operacije koje uprošćuju strukturu objekta brisanjem odnosno desetkovanjem (*decimation*) određenih temena, [1] ili čitavih područja [2]. Metodi optimizacije kao što su *Progressive Meshes* [3], *Simplification Envelopes v1.1* [4], *JADE v2.1* [5] i *QSlim v2.0b* [6]

Duža verzija ovog rada sa analizom drugih objekata objavljena je u *IEEE Transactions on Multimedia* [10].

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).

Goran T. Đorđević, Elektronski fakultet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Republika Srbija e-mail: goran.t.djordjevic@elfak.ni.ac.rs).

Bane Vasić, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Arizona, Tucson, AZ, 85721 USA (e-mail: vasic@ece.arizona.edu).

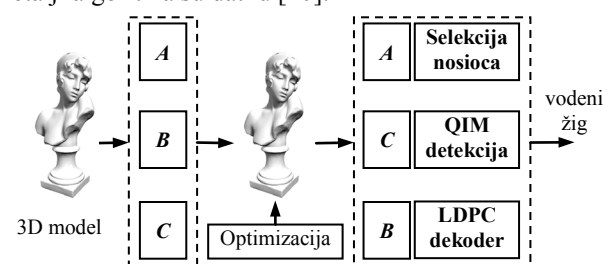
takođe drastično menjaju topološke osobine objekta preraspoređujući geometrijske primitive: temena, ivice i lica. Bilo da se radi o algoritmima koji rade u prostornom ili spektralnom domenu, cilj je identičan: smanjenje broja primitiva uklanjanjem onih koji ne učestvuju, ili su manje važni u definisanju oblika 3D modela.

Ukoliko 3D model posmatramo kao telekomunikacioni kanal kroz koji prenosimo informaciju vodenog žiga, procesi optimizacije ga konvertuju u kanal sa brisanjem, odnosno kanal sa memorijom. Do sada po našem saznanju nije bilo radova koji rešavaju problem ovakvog 3D kanala sa memorijom, iako je bilo pokušaja povećanja robusnosti vodenih žigova u odnosu na procese optimizacije i pojednostavljenja. Uglavom su razmatrane geometrijske karakteristika modela. Benedens [7] uvodi novi algoritam ugradnje vodenog žiga menjanjem raspodele normala. Ipak primarni cilj ovog metoda je povećanje otpornosti podataka na nasumično menjanje rasporeda temena dok je robusnost na optimizaciju sekundarna. Drugi Benedensov metod [8] se primarno bavi povećanjem robusnosti u odnosu na optimizaciju grupisanjem normala u grupe u koje se insertuju biti informacije. Upisivanjem jednog istog bita u više nosioca postiže se smanjenje verovatnoće brisanja bita, ali višestruko smanjuje kapacitet kanala. Naš metod se vodi drugačijom logikom i kroz dva odvojena pravca delovanja postiže adaptivni stepen robusnosti bez smanjenja kapaciteta kanala.

Rad je organizovan na sledeći način: U odeljku II je dat predloženi algoritam. Prvi deo odeljka definiše bazične veličine i karakteristike geometrije na osnovu kojih su izvedeni principi algoritma za selekciju nosioca. Osvrćući se na relevantna istraživanja, drugi deo opisuje principe kvantizacije, run-length i zaštitnog kodovanja, dok su numerički rezultati izračunavanja i simulacija prikazani u odeljku III, u kome se ujedno nalaze zaključci istraživanja i razmatraju postignuti rezultati.

II. PREDLOŽENI ALGORITAM

U ovom poglavlju dajemo opis predloženog algoritma čiji je blok dijagram prikazan na narednoj slici (Sl. 1). Detalji algoritma su dati u [10].



Sl. 1. Blok dijagram predloženog algoritma za skrivanje kodovano vodeni žig u strukturi 3D modela.

Oba algoritma insertovanja i ekstrakcije vodenog žiga imaju identične korake koji su na slici obeleženi sa „A“, „B“ i „C“ i naznačeni samo u delu ekstrakcije.

Upotrebom našeg algoritma za selekciju stabilnih temena [9] dobija se najpre vektor rednih brojeva temena poređanih po opadajućoj vrednosti njihove geometrijske važnosti. Stepem robusnosti se tako može kontrolisati količinom informacija koje će se smestiti u manje sigurnim nosiocima.

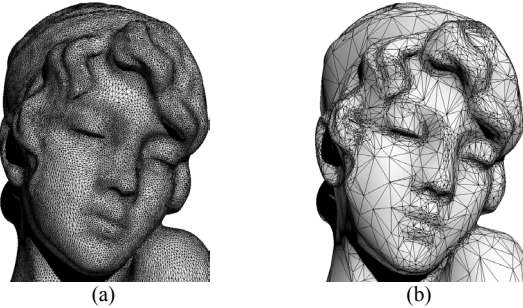
Drugi blok predstavlja runlength kodovanje za konvertovanje kanala sa memorijom u kanal bez memorije u kombinaciji sa *Low Density Parity Check (LDPC)* kodovima za ispravljanje grešaka.

Treći blok podrazumeva retku Quantization Index Modulation (QIM) kvantizaciju koja služi za insertovanje i ekstrakciju bita vodenog žiga.

Ovakav pristup, čiji se opširniji opis nalazi u našem radu [10], pored adaptivne robusnosti i kapaciteta omogućava izbor stepena kompleksnosti kodovanja, primarno u odnosu na očekivani intenzitet desetkovanja temena izazvan procesom optimizacije i sekundarno na maliciozna dejstva unošenjem Gausovog šuma ili brisanjem određenih oblasti 3D modela.

A. Izbor pouzdanog nosioca informacije

Da bi se obezbedila robusnost vodenog žiga na proces pojednostavljenja mreže i pri tome sačuvala perceptualna vernost sa originalnim 3D objektom, temena nosioci se biraju po svojoj važnosti u definisanju oblika. Takve tačke se uglavnom nalaze u zakrivljenim i neravnim oblastima što ilustruje naredna slika (Sl. 2).



Sl. 2. Ilustracija brisanja temena nosioca prilikom optimizacije (a) originalni objekat; (b) optimizovan objekat sa 95% obrisanih temena.

Predloženi algoritam, koristeći izračunavanja suštinskih karakteristika geometrije diskretnog 3D modela, selektuje temena koja su invarijantna na otimizaciju, što redukuje verovatnoću njihovog brisanja. Na Sl. 2b može se primetiti da su, uprkos optimizaciji, temena koja definišu oblik i unutrašnje konture ostala netaknuta. Selekcija ovih temena se bazira na našem skorašnjem radu [9], koji upotrebljava brojna geometrijska i topološka izračunavanja da bi se pronašla temena najpogodnija za ekstrakciju informacije, posle dejstva procesa optimizacije.

Algoritam najpre izdvaja vektor temena koja predstavljaju topološke greške. Zatim se na osnovu vrednosti Gausove i srednje zakrivljenosti $\kappa_G(\mathbf{v}_i)$ i $\kappa_H(\mathbf{v}_i)$ u temenu \mathbf{v}_i označavaju rizična temena. Nakon toga upotrebom ostalih geometrijskih i topoloških kriterijuma algoritam izračunava vektor stabilnosti temena. Za procenu pomenutih karakterističnih zakrivljenosti

korišćeni su osnovni metodi: metod diferencijalne geometrije [11] i metod poklapanja kvadraka [12], [13]:

$$\mathbf{K}(\mathbf{v}_i) = \frac{1}{2\mathcal{A}} \sum_{j \in N(i)} (\cot \alpha_j + \cot \beta_j) (\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i) \quad (1)$$

$$\kappa_G(\mathbf{v}_i) = \frac{1}{\mathcal{A}} \left(2\pi - \sum_{j=1}^f \theta_j \right) \quad (2)$$

gde je f broj susednih trougaonih površi, θ_j ugao j -tog susednog trougla, a \mathcal{A} označava površinu oko temena \mathbf{v}_i .

Za jednostavni kvadrik $z' = ax'^2 + bx'y' + cy'^2$ rešenje sistema linearnih jednačina za zadate vrednosti a', b', c' vodi ka izračunavanju glavnih zakrivljenosti κ_I i κ_{II} .

$$\begin{bmatrix} x_1^2 & x_1 y_1 & y_1^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n^2 & x_n y_n & y_n^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a' \\ b' \\ c' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\kappa_{I/2} = a' + c' \pm \sqrt{(a' - c')^2 + b'^2} \quad (4)$$

Na osnovu izračunatih glavnih zakrivljenosti dolazimo do izraza za izračunavanje Gausove zakrivljenosti i srednje zakrivljenosti date respektivno u sledećem izrazu:

$$\kappa_G = 4a'c' - b'^2, \quad \kappa_H = a' + c' \quad (5)$$

B. Sinhronizacija i zaštitno kodovanje

Jedinu šemu za ugradnju vodenog žiga sa upotrebom kodova za korekciju grešaka koja se može naći u literaturi su predložili Coumou i Sharma [14] za audio signale. Ona se bazira na Davey i MacKay [15] korekcionoj šemi za kanale sa *insertacijom*, *brisanjem* i *substitucijom* i koristi kombinaciju marker kodova za obezbeđivanje sinhronizacije i LDPC kodova za ispravljanje grešaka. Ova šema mora da koristi duge nebinarne LDPC kodove da bi bila efikasna u broju ispravljenih grešaka, što proces dekodovanja čini voma kompleksnim. Pored toga algoritam upotrebljava veoma složen iterativni postupak detekcije simbola (*maximum a posteriori - MAP*) koji radi na ogromnom grafičkom modelu kanala sa insertovanjem, brisanjem i substitucijom.

Kanal koga predstavlja 3D diskretni model u procesu afine transformacija i optimizacionih procesa, za razliku od audio kanala, nije izložen insertovanju i substituciji bita, već samo brisanju. Sa druge strane, naš metod problem sinhronizacije rešava u prethodnom koraku, ugradnjom informacije u nosioce sa malom verovatnoćom brisanja. Ipak, kao dodatni nivo zaštite od nedostatka sinhronizacije nastale brisanjem bita, uvodimo runlength kodovanje informacije koja je prethodno kodovana binarnim LDPC kodom.

1) Runlength kodovanje

Transformaciju kanala sa beskonačnom memorijom u kanal bez memorije obavljamo predstavljanjem bita informacije duzinom *runs*. *Run* duzine k u binarnoj sekvenci definišemo kao subsekvencu sacinjenu od k uzastopnih identičnih simbola. Dužine runs sekvenci se određuju na osnovu statistike sinhronizacije kanala i predstavljaju (koduju) ulazne nule i jedinice. Radi ilustracije može se koristiti primer gde su binarne nule predstavljene sa runs dužine dva, binarne jedinice sa runs dužine tri, dok su sve neparne sekvence predstavljene

jedinicama, a parne nulama [16]. Tako za informacionu sekvencu ulaznih bita $b = (0, 1, 1, 0, 1, 1)$ runlength sekvenca c je data kao $c = (11\ 000\ 111\ 00\ 111\ 000)$.

Kako su simboli različite dužine, neophodna je optimizacija verovatnoće simbola. Optimizacija uzajamne informacije $I(\mathbf{X};\mathbf{Y})$ između ulaznog alfabeta \mathbf{X} i izlaznog \mathbf{Y} , nad svim izlaznim raspodelama \mathbf{X} , određuje Shannon kapacitet kanala bez memorije, koji je u diskretnom slučaju dobijen maksimizacijom uzajamne informacije $I(\mathbf{p})$ nad svim vektorima ulaznih raspodela verovatnoće

$$\mathbf{p} = (p(x))_{x \in X} \quad (6)$$

U slučaju da cena prenosa različitih simbola nije jednaka u kanalu sa nejednakim dužinama simbola, $c(x)$ dužina simbola x može biti posmatrana kao cena prenosa simbola. Ako sa $\mathbf{c}=(c(x))_{x \in X}$ definišemo vektor cene prenosa, za takve kanale koristimo pojam normalizovanog kapaciteta (*Unit Cost Capacity*) kanala [17]:

$$C_{jed} = \max_{\mathbf{p}} \left(\frac{I(\mathbf{p})}{\mathbf{c}\mathbf{p}^T} \right) \quad (7)$$

Kapacitet je funkcija verovatnoće greške sinhronizacije, kao i veličine ulaznog alfabeta \mathbf{X} . Spektar šema prenosa može biti dobijen promenom veličine alfabeta na ulazu.

2) Kodovanje kodovima za korekciju grešaka

Neka je \mathcal{C} jedan (n,k) LDPC kod na binarnom polju GF(2). \mathcal{C} je definisan nultim prostorom parity-check matrice H od \mathcal{C} , dimenzije $m \times n$. H je matrica dvostrukog susedstva, a Tanner graf G je bipartitni graf sa dva skupa čvorova: n – čvorova promenljive (bita) $V=\{1, \dots, n\}$ i m – čvorova provere $C_{check}=\{1, \dots, m\}$. Vektor $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ je kodna reč ako i samo ako $\mathbf{x}H^T = 0$, gde je H^T transponovano H . Ovaj rad razmatra (d_v, d_c) - regularne LDPC kodove, odnosno kodove sa Tanner grafom G , u kome svi čvorovi promenljive imaju stepen d_v , a čvorovi provere stepen d_c . Takvi kodovi imaju odnos $R \geq 1 - d_v/d_c$ [17]. Parity-check matrica struktuisanog LDPC koda je polje permutacionih matrica dobijenih iz *latinskih kvadrata* (*Latin Squares*). Permutaciona matrica je kvadratna binarna matrica koja ima tačno jednu vrednost „1“ u svakom redu i koloni i nule na svim ostalim poljima, dok kodovi [18] koriste permutacione matrice koje podržavaju nepovezanost.

Iterativno dekodovanje može da se prikaže kao poruka koja se prenosi Tanner grafom [19]. Algoritam *saberi i pomnoži* (*sum-product algoritam*) uzima a priori informaciju bita na poziciji j , $\mu_j^{(0)}$ kao logaritama odnosa verodostojnosti i -tog bita $\log(P(x_i = 0 | r_i)/P(x_i = 1 | r_i))$, gde je $P(x_i = 0 | r_i)$ a posteriori verovatnoća da je bit x_i nula, kada je primljeni simbol r_i . Poruke koje su prenešene od čvora promenljive j do čvora provere c bipartitnog grafa su vraćene u $\mu_j^{(0)}$. U i -toj iteraciji se ažuriraju poruke $\Lambda_{c,j}^{(i)}$ da bi se prenele od čvora provere c do čvora bita j , kao i poruke $\lambda_{j,c}^{(i)}$ koje se prenose sa čvora bita j do čvora provere c , tako da važi:

$$\lambda_{j,c}^{(i)} = \mu_j^{(0)} + \sum_{d \neq c} \Lambda_{d,j}^{(i)} \quad (8)$$

Poslednji korak iteracije i je izračunavanje ažuriranog logaritma lajklihud odnosa tako da važi sledeći izraz:

$$\mu_j^{(i)} = \mu_j^{(0)} + \sum_c \Lambda_{c,j}^{(i)} \quad (9)$$

Svaki bit j se procenjuje kao $\hat{x}_j = 1$ ako $\mu_j^{(i)} < 0$ i $\hat{x}_j = 0$ u protivnom. Procedura se prekida kada se dobije (validna) kodna reč ili ako se pre toga dostigne zadati broj iteracija.

C. Retka QIM kvantizacija

Prilikom ugradnje vodenog žiga kombinuje se n -dimenzionalni vektori \mathbf{w} i \mathbf{x} da bi se dobila sekvenca ugrađenog vodenog žiga $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^n$, gde su $\mathbf{w}=\{0,1\}^n$ i $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ vektori vodenog žiga i nosioca respektivno. Razlika $\mathbf{u} = \mathbf{y} - \mathbf{x}$ predstavlja vektor pomeranja usled ugradnje. Izobličenje $d(\mathbf{x},\mathbf{y})$ se mora držati u dozvoljenim granicama $d(\mathbf{x},\mathbf{y}) \leq nD$ gde je D maksimalno dozvoljeno izobličenje po jednoj dimenziji za svako \mathbf{w} i \mathbf{x} . Izobličenje se najčešće definiše Euklidskim ili Hausdorff rastojanjem.

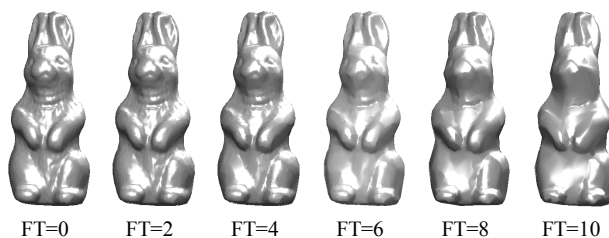
QIM funkcioniše nezavisno na elementima w i x , vektora \mathbf{w} i \mathbf{x} . Da bi se ugradio bit $w=\{0,1\}$, potrebna su dva uniformna kvantizera Q_0 i Q_1 , definisana kao preslikavanja:

$$Q_w(x) = \Delta \left[\frac{1}{\Delta} \left(x - (-1)^w \frac{\Delta}{4} \right) \right] + (-1)^w \frac{\Delta}{4} \quad (10)$$

gde $[*]$ predstavlja operaciju zaokruživanja, pa za realno x , $[x]$ predstavlja celobrojnu vrednost najbližu x . Tako se nominalna kvantizaciona vrednost pomera gore-dole za $\Delta/4$ u zavisnosti od vrednosti vodenog žiga w . Ekvivalentno tome, vodeni žig izobličava signal nosioca x za $\pm\Delta/4$, a bit vodenog žiga određuje izbor kvantizera. Tako je kvantizacija $y=Q_w(x)$ funkcija nosioca, pri čemu je minimalna proizvedena greška $\Delta/2$. Pod pretpostavkom uniformne raspodele grešaka kvantizacije preko intervala $[-\Delta/2, \Delta/2]$, srednje kvadratna greška izobličenja je $\Delta^2/12$. Ignorisanje sadržaja 3D objekta prilikom kvantizacije može dovesti do ozbiljnih perceptivnih degradacija u odnosu na HVS (Human Visual System) čak i za mala Euklidska ili Hausdorff rastojanja. Da bi se ovo izbeglo vektor nosioca \mathbf{x} je selektovan tako da se temena nalaze u perceptivno manje vidljivim područjima [9].

III. NUMERIČKI REZULTATI

Za sva izračunavanja koristili smo sledeće 3D modele: A - Cow, B. – Hand, C – Horse i D. – Rabbit. U temena ovih objekata upisali smo kodirani vodeni žig dužine 1000 bita, nakon čega smo primenili modifikator optimizacije iz paketa 3Ds Max 2013, koristeći vrednosti *Face Threshold* FT= [0, 2, 4, 6, 8, 10]. Slika Sl. 3 prikazuje nivo perceptualnog oštećenja objekta „D“ usled dejstva optimizacije.



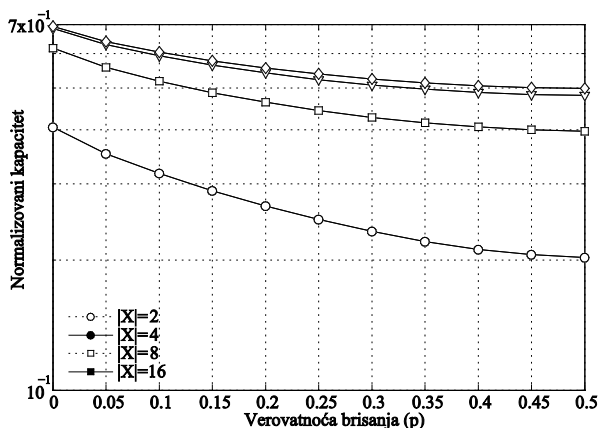
Sl. 3. Perceptualna degradacija modela u odnosu na stepen optimizacije izražen preko vrednosti FT.

Pod uticajem geometrijskih degradacija izazvanih pojednostavljenjem mreže određeni broj temena koja su sadržala informaciju vodenog žiga je izbrisan. Sledeća tabela (Tabela 1) prikazuje relaciju ukupnog broja preostalih temena i broja izbrisanih temena sa vodenim žigom, pri čemu je takođe prikazan odnos broja izbrisanih temena koja su za ugradnju vodenog žiga izabrana nasumično i upotrebom našeg OSVETA algoritma [9].

TABELA 1 ODNOS BROJA IZBRISANIH TEMENA 3D MREŽA ZA RAZLIČITE VREDNOSTI FT OPTIMIZACIJE

	FT=0	FT=2	FT=4	FT=6	FT=8	FT=10
Broj temena A	2903	2776	2465	2060	1728	1372
#random	0	47	139	247	345	447
#OSVETA	0	1	6	36	80	184
Broj temena B	36616	15200	5973	2870	1855	1290
#random	0	581	821	918	930	944
#OSVETA	0	0	38	216	442	582
Broj temena C	112642	43782	18805	9938	5918	3702
#random	0	615	829	914	947	959
#OSVETA	0	1	14	48	121	279
Broj temena D	70658	27098	8493	3411	1637	892
#random	0	592	870	952	971	972
#OSVETA	0	5	42	243	543	715

Naredna slika [10] prikazuje normalizovani kapacitet našeg kanala za kodne reči dužine 2,4,8 i 16, izračunat Jimbo-Kunisawa algoritmom [20].



Sl. 4. Normalizovani kapacitet za kodne reči dužina 2,4,8 i 16 u odnosu na verovatnoću brisanja nosioca informacije.

Iz rezultata se može zaključiti da je robusnost vodenog žiga postignuta sa jedne strane izborom pouzdanih nosioca i sa druge iterativnim kodovanjem koje je omogućeno konvertovanjem kanala sa memorijom u kanal bez memorije. Konverzija je ostvarena upotrebom Runlength kodova, dok zasluge povećanja robusnosti pre kodovanja pripadaju našem algoritmu za selekciju stabilnih nosioca.

Opisani metod spada u grupu slepih vodenih žigova što je obezbeđeno QIM kvantizacijom, tačnije izborom jednog od dva kvantizera prilikom upisa i čitanja bita informacije.

LITERATURA

[1] W.J. Schroeder, J.A. Zarge, and W.E. Lorensen, „Decimation of triangle meshes,” *Proc. of the SIGGRAPH 92*, ACM SIGGRAPH, 26(2):65–70, 1992.

[2] H. Hoppe, T. DeRose, T. Duchamp, J. McDonald and W. Stuetzle, „Mesh Optimization,” in *Proc. SIGGRAPH 93*, ACM SIGGRAPH, pp. 19–26, 1993.

[3] H. Hoppe, „Progressive Meshes,” in *Proc. SIGGRAPH 96*, ACM SIGGRAPH, pp. 99-108, 1996.

[4] 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.

[5] M. Garland and P.S. Heckbert, „Surface Simplification using Quadric Error Metrics,” in *Proc. SIGGRAPH 97*, ACM SIGGRAPH, pp. 209–216, 1997.

[6] P. Lindstrom and G. Turk, „Fast and Memory Efficient Polygonal Simplification,” in *Proc. Visualization '98*, IEEE Computer Soc. Press, pp. 279–286, 1998.

[7] O. Benedens, „Geometry-Based Watermarking of 3D Models,” *IEEE Computer Graphics & Application*, vol. 19, no. 1, pp. 46 - 55, January/February 1999.

[8] O. Benedens, „Watermarking of 3D polygon based models with robustness against mesh simplification,” in *Proc. SPIE: Security and Watermarking of Multimedia Contents*, 1999, pp. 329–340.

[9] B. Vasic, „Ordered Statistics Vertex Extraction and Tracing Algorithm (OSVETA),” *Advances in Electrical and Computer Engineering*, vol. 12, no 4, pp. 25 -32, Nov. 2012.

[10] B. Vasic and B. Vasic, „Simplification Resilient LDPC-Coded Sparse-QIM Watermarking for 3D-Meshes,” *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 15, no. 7, pp. 1532-1542, November 2013.

[11] M. Meyer, M. Desbrun, P. Schroder and A. H. Barr, „Discrete Differential-Geometry Operators for Triangulated 2-Manifolds mesh,” *In Proc. VisMath'02*, Berlin, Germany, 2002.

[12] D. Cohen-Steiner and J. M. Morvan. “Restricted Delaunay triangulations and normal cycle.”, in *Proc. of the 19th annual ACM symp. on Comp. geometry (SCG '03)*, June 2003, pp. 312 - 321.

[13] P. Alliez, D. Cohen-Steiner, O. Devillers, B. Levy and M. Desbrun, „Anisotropic Polygonal Remeshing,” in *Proc ACM Transactions on Graphics, SIGGRAPH 2003*, Vol. 22, No 3, 2003.

[14] D. Coumou and G. Sharma, „Insertion, deletion codes with feature-based embedding: a new paradigm for watermark synchronization with applications to speech watermarking,” *IEEE Transactions on Inf. Forensics and Security*, vol. 3, no. 2, pp. 153-165, June 2008.

[15] M. C. Davey and D. J. C. Mackay, “Reliable communication over channels with insertions, deletions, and substitutions,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 47, no. 2, pp. 687–698, Feb. 2001.

[16] R. Krishnan and B.Vasic, „Coding for correcting insertions and deletions in bit-patterned media recording,” *In Proc. IEEE Global Telecom. Conf. (GLOBECOM '11)*, Dec. 2011, pp 1-5.

[17] S. Verdu, „On Channel Capacity per Unit Cost,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 36, no. 5, pp. 1019 – 1030, Sep. 1990.

[18] D. V. Nguyen, S. K. Chilappagari, B. Vasic and M. W. Marcellin, „On the construction of structured LDPC codes free of small trapping sets,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 58, no. 4, pp. 2280 - 2302, April 2012.

[19] B. Vasic and O. Milenkovic, "Combinatorial constructions of low-density parity-check codes for iterative decoding," *IEEE Trans. on Information Theory*, vol. 50, no. 6, pp. 1156 - 1176, June. 2004.

[20] M. Jimbo and K. Kunisawa, “An iteration method for calculating the relative capacity,” *Information and Control*, vol. 43, no. 2, pp. 216–223, November 1979.

ABSTRACT

This paper discusses the performance a new robust, spatial, blind watermarking method for hiding encoded data into a geometric structure of the three-dimensional (3D) mesh model. By combining an algorithm for reliable host vertex selection and error correction codes, our watermarking neutralizes negative influence of optimization to watermark resilience. Using geometrical criteria, the algorithm selects mesh vertices with a minimum deletion probability in the optimization process. Selected vertices are then used by a quantizer for embedding the encoded watermark information. The watermark is reconstructed in a two step process involving the blind extraction of selected vertices and decoding of embed data.

BLIND AND ROBUST 3D MESH WATERMARKS

Bata Vasic, Goran T. Đorđević and Bane Vasic