

Bağlanırlıkla Yönlendirilmiş Uyarlamalı Dalgacık Dönüşümü İle Üç Boyutlu Model Sıkıştırılması *

(3D Model Compression using Connectivity-guided Adaptive Lifting Transform)

Kıvanç Köse¹, A. Enis Çetin¹, Uğur Güdükbay², Levent Onural¹

¹ Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, ² Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
Bilkent Üniversitesi, Ankara

kkivanc@ee.bilkent.edu.tr, cetin@bilkent.edu.tr, gudukbay@cs.bilkent.edu.tr,
onural@ee.bilkent.edu.tr

Öz

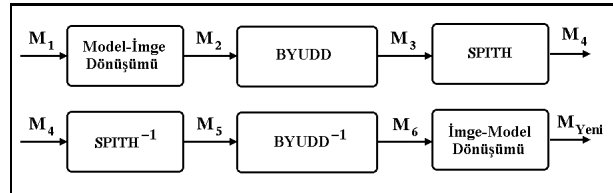
Dikdörtgensel olmayan dalgacık dönüşümüne dayalı çok çözünürlüklü üç boyutlu model sıkıştırılması için iki yöntem önerilmektedir. Bunlar Sıradüzensel Ağaç Yapılarının Kümelere Bölüntülenmesi (Set Partitioning In Hierarchical Trees - SPIHT) ve JPEG2000 tekniklerine dayanmaktadır. Üç boyutlu modeller düzenli ızgara yapılar üzerinde tanımlı iki boyutlu imgelere dönüştürülmekte, ve bu gösterim bağlanırlıkla yönlendirilmiş uyarlamalı dalgacık dönüşümünden geçirilerek ortaya çıkan dalgacık kümesi verisi SPITH veya JPEG2000 yöntemlerinden biri uygulanarak bit dizgisine dönüştürülmektedir. SPIHT ile elde edilen bit dizgisinin değişik uzunluklardaki bölümlerinden modelin değişik çözünürlüklerde geri çözümlenmesi mümkün olduğundan önerilen bu yöntem modellerin aşamalı gösterimine olanak sağlamaktadır. Dalgacık dönüşümü verilerinin SPIHT ile kodlanmasıyla elde edilen sonuç JPEG2000 ve MPEG-3DGC ile yapılan kodlamanın sonucundan daha başarılı olmuştur.

Abstract

Two compression frameworks that are based on a Set Partitioning In Hierarchical Trees (SPIHT) and JPEG2000 methods are proposed. The 3D mesh is first transformed to 2D images on a regular grid structure. Then, this image-like representation is wavelet transformed employing an adaptive predictor that takes advantage of the connectivity information of mesh vertices. Then SPIHT or JPEG2000 is applied on the wavelet domain data. The SPIHT based method is progressive because the resolution of the reconstructed mesh can be changed by varying the length of the one-dimensional data stream created by SPIHT algorithm. The results of the SPIHT based algorithm is observed to be superior to JPEG2000 based mesh coder and MPEG-3DGC in rate-distortion

1. Giriş

Literatürde birçok üç boyutlu (3B) model sıkıştırma yöntemi bulunmaktadır [1, 2, 3]. Bu yöntemlerin neredeyse hepsi doğrudan 3B modeller üzerinde uygulanmaktadır. Burada önerilen yöntem, 3B modelleri düzenli ızgara yapılar üzerinde tanımlı iki boyutlu imgelere dönüştürmekte, ve böylece sinyal işleme yöntemlerinin doğrudan kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Bağlanırlıkla yönlendirilmiş uyarlamalı dalgacık dönüşümü (BYUDD) sayesinde, imge piksellerinin, başka bir deyişle 3B model köşelerinin, arasındaki ilinti daha verimli kullanılmaktadır. Bu imgeler Sıradüzensel Ağaç Yapılarının Kümelere Bölüntülenmesi (Set Partitioning In Hierarchical Trees - SPIHT) ya da JPEG2000 kullanılarak sıkıştırılmaktadır. Modelin geri çözümlenmesi, işlemlerin terslerinin uygulanması ile sağlanır. Önerilen yöntemin blok diyagramı Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1: Önerilen sıkıştırma yönteminin blok diyagramı. M_i verinin i katındaki gösterimidir.

Dönüşüm katı sonrası oluşan imgelerin piksel değerleri, 3B modelde karşılık geldiği köşe noktasının uzaydaki daha önceden kararlaştırılmış bir düzleme olan dik uzaklığı ile ilişkilidir. Yani imgelerin piksel değerleri, 3B uzayda hangi düzlem seçildiği ile doğrudan alakalıdır. Örnek olarak, seçilen düzlem $x - y$ düzlemi ise o zaman piksel değerleri poligon köşe verisinin z koordinatlarıdır.

Sinyal işleme yöntemlerini 3B modellerde uygulamanın iki değişik yolu daha bulunmaktadır. Bunlardan biri modelin parametrize edilmesi [4], diğeri ise sinyal işleme yöntemlerinin üzerinde oynama yapılarak 3B modeller üzerinde kullanılabilir hale getirilmesidir [5]. Bunların ikisi de zor işlemlerdir. Burada

*Bu çalışma Avrupa Topluluğu 6. Çerçeve Programı tarafından 511568 No'lu proje kapsamında (3DTV: Integrated 3D Television: Capture, Transmission, and Display) desteklenmektedir.

önerilen yöntem kullanılarak 3B modelin imgelere indirgenmesi ise basit bir işlem olup imge ve video işleme yöntemlerinin direk olarak kullanılabilmesine olanak sağlar.

Bu bildiri şu şekilde organize edilmiştir. 3B verinin 2B imgelere dönüştürülmesi ve sıkıştırılması ile ilgili yöntemler 2. bölümde, önerilen algoritmaların sıkıştırılması sonuçları 3. bölümde ve varyantlar 4. bölümde verilmektedir.

2. Üç boyutlu Modellerin Sıkıştırılması

2.1. İklendirme ve Izgara Yapıları Üzerine İzdüşümü

3B model verisi geometri ve bağımlılık bileşenlerinden oluşmaktadır. 3B uzayda bir noktanın koordinatlarının $\mathbf{X}' = (x', y', z')^T$ olduğunu varsayarsak, bir poligon köşesi

$$\mathbf{s}'_i = (x'_i, y'_i, z'_i)^T, \quad i = 1, \dots, M, \quad (1)$$

şeklinde tanımlanır. Modelin geometri verisi $R^3[-0.5, 0.5]$ aralığına α sabit bir sayı olmak üzere,

$$\mathbf{X} = (x, y, z)^T = \alpha \mathbf{X}' \quad (2)$$

olarak normalize edilir. Modelin normalize edilmiş köşe noktaları

$$\mathbf{s}_i = (x_i, y_i, z_i)^T, \quad i = 1, \dots, M. \quad (3)$$

şeklinde tanımlanır.

Seçilen izdüşümü düzlemi $\mathbf{P}(u, v)$, \mathbf{V} matrisi kullanılarak örneklenir. Kullanılabilecek nicemleme matrislerinin tanımı ve türleri [6]'da verilmektedir.

3B modelin köşe koordinatı \mathbf{s}_i 'nin \mathbf{P} düzlemine izdüşümünün $\tilde{\mathbf{s}}_i$ olduğunu düşünüldüğünde piksel indeksleri $\mathbf{n} = [n_1, n_2]^T$ 'ye gelen köşe noktalarının oluşturduğu küme,

$$J = \left\{ j \mid |\tilde{s}_j - \mathbf{V}\mathbf{n}^T| < T/2, \quad \forall n_1, n_2 \right\} \quad (4)$$

şeklinde tanımlanır. Örnekleme matrisi yan yana komşuların aralarındaki uzaklığı belirler. Daha sonra model üç boyutlu gösteriminden iki boyutlu imge gösterimine,

$$\mathbf{I}_1[n_1, n_2] = \begin{cases} \tilde{d}_i, & i \in J \\ 0, & \text{bunun dışında,} \end{cases} \quad (5)$$

$$\mathbf{I}_2[n_1, n_2] = \begin{cases} i, & \tilde{d}_i = \mathbf{I}_1[n_1, n_2], \\ 0, & \text{bunun dışında,} \end{cases} \quad (6)$$

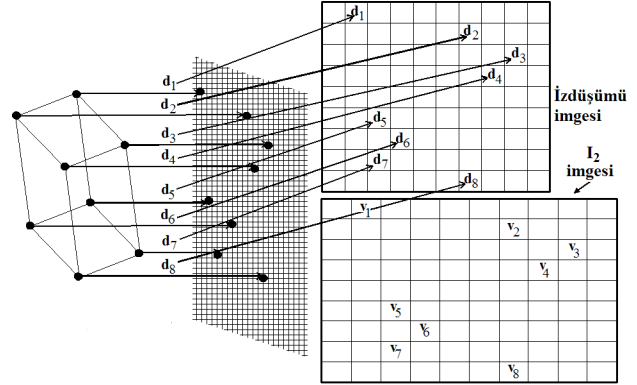
şeklinde çevirilir.

\mathbf{I}_1 imgesi daha sonra BYUDD ile altbantlarına ayrılıp, SPIHT ya da JPEG2000 ile kodlanmaktadır. \mathbf{I}_2 imgesi ise köşe noktalarının indekslerini tutmaktadır. Bu imge daha sonra bir listeye dönüştürülür ve kodlanır.

Piksel-köşe noktaları arasındaki eşleşmeler (5). ve (6) kullanılarak bulunur. Fakat bazı köşe noktaları için bu işlem yapılamaz. Bunun nedeni bazı piksellerin izdüşümlerinin çakışması ve çakışanlar arasından bir tanesinin seçilip diğerlerinin gözardı edilmesidir. Örnekleme aralıkları azaltılarak daha az sayıda köşe noktasının gözardı edilmesi sağlanabilir.

Bu sayede, geri çatılan modelin görüntü kalitesi artar. Ancak daha fazla noktanın iletimi gerektiğinden, bu durumda sıkıştırma oranı düşer. Bölüm 2.4'de anlatılan yöntemde kullanılan *bağımlılıkla yönlendirilmiş aradeğerleme* yöntemi sayesinde göz ardı edilen köşe noktaları en az hata ile geri çatılmaktadır.

İzdüşümü yöntemi ve 3B modelin imge benzeri gösterimi Şekil 2'de görülmektedir. Piksel değerleri 3B modelin köşe noktalarının izdüşüm düzlemine olan uzaklıkları olup imgenin büyük bir kısmı sıfırlardan oluşmaktadır.



Şekil 2: İzdüşümü yöntemi ve oluşan imge benzeri temsiller.

2.2. Bağımlılıkla yönlendirilmiş uyarlamalı dalgacık dönüşümü

Doğal ortamlarda elde edilmiş sıradan resimlerde genellikle yanyana pikseller arasında bir ilinti bulunur. Bunun aksine, burada bahsedilen imgelerde komşuluk ilintisi yanyanalıklı değil, bağımlılık verisi ile belirlenmektedir. Bu nedenle, doğal imgeler üzerinde kullanılan dalgacık dönüşümü burada bahsedilen imge benzeri yapılarda iyi çalışmamaktadır. BYUDD sayesinde, imge pikselleri arasındaki bağıntı daha iyi değerlendirilmekte ve daha başarılı piksel öngörülleri yapılabilmektedir.

\mathbf{I}_1 ve \mathbf{I}_2 imgeleri ilk olarak tembel dalgacık dönüşümü ile yatay eksende,

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_a[n_1, n_2] &= [\mathbf{I}_{a1} \mid \mathbf{I}_{a2}], \\ \mathbf{I}_{a1}[n_1, n_2] &= \mathbf{I}[n_1, 2n_2], \\ \mathbf{I}_{a2}[n_1, n_2] &= \mathbf{I}[n_1, 2n_2 + 1], \quad a = 1, 2. \end{aligned} \quad (7)$$

şeklinde ikiye ayrılır. Daha sonra bağımlılık bilgisi kullanılarak köşe noktalarının komşuları bulunur. Köşe noktalarının komşuluk ilişkisi $nlist(j)$, $j = 1, \dots, M$ diziliminde saklanır. Bu liste daha sonra,

$$nlist_{valid}(j) = nlist(j) \cap \mathbf{I}_{21}[n_1, n_2]. \quad (8)$$

şeklinde yenilenir. $\mathbf{I}_{12}[n_1, n_2]$ 'nin değerleri için yapılacak olan öngörüler $nlist_{valid}$ listesi kullanılarak şu şekilde yenilenir:

$$\mathbf{I}_{k \text{ pred}} = \frac{\sum_m (\mathbf{I}_{11}[n_1, n_2])}{m}. \quad (9)$$

Buradaki koşul $\mathbf{I}_{21}[n_1, n_2] \in nlist_{valid}(k)$ olmasıdır. m 'nin değeri ise $nlist_{valid}(k)$ 'nin eleman sayısıdır. Geometri imgesinin \mathbf{I}_{22} kısmında bulunan köşe noktalarının oluşturduğu listenin her elemanı 9.denklem kullanılarak hesaplanır. Yukarıda bahsedilen öngörü değerleri kullanılarak $\mathbf{I}_{12}[n_1, n_2]$ değerleri

$$\mathbf{I}_{n12}[n_1, n_2] = \mathbf{I}_{12}[n_1, n_2] - \mathbf{I}_{kpred}, I_{22}[n_1, n_2] = k, (10)$$

şeklinde yenilenir.

Eğer bir köşe noktası 8. denklem kullanılarak hesaplanmazsa bu durumda bir öngörü yapılmaz ve pikselin değeri aynen alınır. Daha sonra $\mathbf{I}_{11}[n_1, n_2]$ dikey yönde ikiye ayrılarak aynı işlem yinelenir. Sonuçta oluşan dört resimden en düşük frekansı temsil eden yukarıda bahsedilen yöntemle imgenin boyutu bir piksel büyüklüğüne ulaşıncaya kadar işlenebilir. Anlatılan BYUDD yöntemi kayıpsız olarak geri dönüşüme imkan vermektedir.

2.3. İmgelerin Sıkıştırılması

3B modeller burada anlatılan izdüşümü yöntemi kullanılarak iki imgeye dönüştürülür. Böylece elde edilen imgeler, istenilen resim sıkıştırma yöntemleri kullanılarak sıkıştırılabilir. Burada SPIHT ve JPEG2000 kullanılarak bu imgelerin sıkıştırılmasına dair iki yöntem test edilmiştir. SPIHT ile yapılan sıkıştırmada, alıcıya gönderilen bit dizgisi uzunluğu ve yapılan dalgacık dönüşümü sayısı, JPEG2000 de ise nicemleme seviyesi sayısı ve yapılan dalgacık dönüşümü sayısı, geriçatılan modelin kalitesini belirleyen en önemli faktörlerdir. Kullanılacak bit dizgisi uzunluğu (SPIHT) ve nicemleme seviyesi sayısı (JPEG2000), izdüşümü yöntemi sırasında kullanılan *örnekleme aralığı* özelliği ile doğru orantılıdır. Nicemleme aralığı azaldıkça, kullanılan dizgi uzunluğu (SPIHT) ya da nicemleme seviyesi sayısı (JPEG2000) azaltılabilir.

Geri çatılan 3B modeldeki bozulma miktarı görsel olarak ya da iki model arasındaki *Hausdorff Uzaklığı* gösteren programlar kullanılarak ölçülebilir. Burada da kullanılan METRO [7] ve *MeshTool* [8] isimli programlar iki 3B model arasındaki *Hausdorff Uzaklığını* ölçmektedir.

Burada bahsedilen SPIHT temelli algoritma farklı uzunluklardaki bit dizgileri kullanarak modelin değişik çözünürlüklerde geri çatılabilmesini sağlar. Böylece, modelin kademeli kodlanması sağlanmaktadır. Bir SPIHT bit dizisinin içerdiği kodlanmış model bilgisi aşamalı bir yapıya sahiptir. Öncü bitler, kodlanan verinin alçak frekanslarını temsil ederken, daha sonraki bitler verinin ayrıntılarını gösterir. Buradaki önemli konulardan biri de bit dizgisinin sonundaki bitlerin sıfırlanmasının baştaki bitlerin sıfırlanmasına göre daha az bozulmaya neden olmasıdır. Bu SPITH kodlamasının doğal bir sonucudur [9, 10]. Burada bahsedilen SPIHT temelli yöntemde, sonradan gelen bitlerin bir kısmı kullanılmayarak bir sıkıştırma sağlanmakta ve geri çatılan modelin bozulma miktarına bakılmaktadır.

SPIHT ve JPEG2000 kullanılarak elde edilen bit dizgisi daha sonra aritmetik kodlama ile sıkıştırılır. Burada bahsedilen uygulamada *gzip* yazılımı kullanılmıştır [11]. Bu yazılım Lempel-Ziv kodlama algoritmasının [12] bir gerçekleştirimidir.

2.4. İmgelerden Üç boyutlu Modellerin Geri Çatılması

3B modeller SPITH tarafından oluşturulan bit dizgisi ve köşe indeksleri (ikinci kanal) ile detay seviyesi sabiti, normalizasyon sabiti v.b. bilgiler kullanılarak geri çatılır. Fakat bu bilgilerin veri büyüklüğü 3B modelin geometri bileşeninin veri büyüklüğü ile karşılaştırıldığında ihmal edilebilir.

Bit dizgisi SPIHT ya da JPEG2000 kodlamasının tersi kullanılarak yeniden imgelere dönüştürülür. Daha sonra iki kanal da kullanılarak 3B uzaya geri-izdüşümü alınır. Burada kullanılan verinin daha önceden nicemlenmiş olduğu göz önüne alındığında modelin tam olarak orijinal haline geri çatılamayacağı kesindir.

3B modelin bazı köşeleri, model imgeye dönüştürülürken çakışmış ve kaybolmuş olabilir. Burada kaybolan bilgiyi toparlamanın iki yolu vardır. Bu durumda kaybolan köşelerin aradeğerlemesine başvurulur. Bu işlem köşenin koordinatlarının komşuları kullanılarak aradeğerlemesinin yapılmasıdır. Komşuların bulunması işlemi ise üç boyutlu modelin bağlanırlık verileri kullanılarak yapılır.

3. Sonuçlar

Bu bildiride sunulan uygulama “INRIA Gamma Team Research database Website Collections dan alınan 4930 köşe noktasına sahip 98 KB büyüklüğündeki “Homer Simpson ve “www.ics.uci.edu/~pablo/files/data/genus-non-0/9HandleTorus.ply” adresinden alınan 9392 köşe noktasına sahip 165 KB büyüklüğündeki “9 Handle Torus” modelleri üzerinde denenmiştir.

SPIHT Size-(KB)	Haus. Uzak. (SPIHT)	JPEG2000 Size-(KB)	Haus. Uzak. (JPEG2000)
7.84	0.009638	13.6	0.036387
8.18	0.010951	14.0	0.036183
8.96	0.010699	14.1	0.036468
11.9	0.008904	16.7	0.036266
12.7	0.007685	16.9	0.036459

Tablo 1: 9 Handle Torus modelinin SPIHT ve JPEG2000 ile sıkıştırılması sonuçları. Uzaklık değerleri orijinal ve geri çatılmış modeller arasındaki Hausdorff uzaklığıdır.

Tablo 1 ve 2’de Homer Simpson ve 9 Handle Torus modellerinin farklı bit dizgisi büyüklüklerine karşılık gelen bozulma miktarlarını göstermektedir. Tablo 1 ve 2’de görüldüğü gibi SPIHT ile yapılan sıkıştırma işlemi JPEG200 ile yapılanaya göre daha iyi sonuç vermektedir.

4. Vargılar

Bu makalede, 3B model sıkıştırmasında imge sıkıştırma yöntemlerinin, 3B modellere uyarlanmadan [5] ya da 3B modele parametrisasyon uygulanmadan [4] kullanılabilceği gösterilmiştir. Burada verilen sonuçlar, [13]’de sunulan sonuçlar ile karşılaştırıldığında bağlanırlıkla yönlendirilmiş öngörünün daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. BYUDD sayesinde pikseller arası komşuluğun yeniden tanımlanması ve buna bağlı olarak pikseller arası

SPIHT Size-(KB)	Haus. Uzak. (SPIHT)	JPEG2000 Size-(KB)	Haus. Uzak. (JPEG2000)
4.07	0.060922	6.58	0.076215
4.37	0.033648	6.27	0.076107
4.67	0.019715	9.64	0.076488
4.96	0.013422	9.28	0.076374
5.55	0.015236	12.7	0.075922
6.76	0.005503	12.2	0.075699
7.92	0.005216	11.4	0.075680

Tablo 2: Homer Simpson modelinin SPIHT ve JPEG2000 ile sıkıştırılması sonuçları. Uzaklık değerleri orijinal ve geri çatlınmış modeller arasındaki Hausdorff uzaklığıdır.

ilintinin daha verimli kullanılması, sonuçlardaki bu iyileşmeye yol açmaktadır.

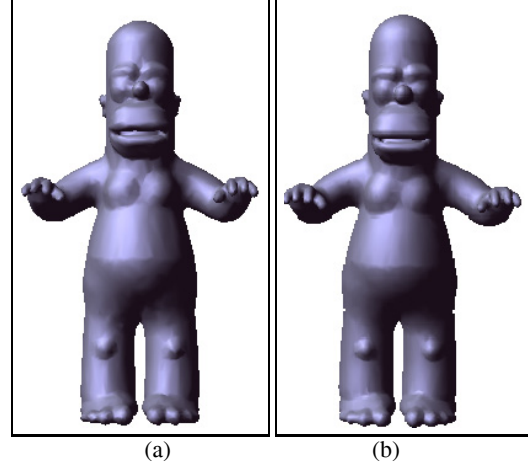
Model	Sıkıştırma Algoritması	Veri (KB)	Hausdorff Uzaklığı	Ortalama Uzaklık
Homer	MPEG-3DGC	41.8	0.002645	0.00066
Homer	SPIHT	14.72	0.003090	0.00047
Homer	SPIHT	9.34	0.005216	0.00093
9H.Torus	MPEG-3DGC	82.8	0.001563	0.00060
9H.Torus	SPIHT	12.7	0.009797	0.00093

Tablo 3: Homer Simpson ve 9 Handle Torus modellerinin MPEG-3DGC ve SPIHT ile sıkıştırılması sonuçları. Uzaklık değerleri orijinal ve geri çatlınmış modeller arasındaki Hausdorff uzaklığıdır.

SPIHT kullanılarak yapılan sıkıştırma işlemi, JPEG2000 ile yapılan sıkıştırma işlemine göre daha iyi sonuç vermiştir. Ayrıca MPEG-3DGC ile yapılan karşılaştırmalar sonucunda (bkz. Tablo 3) SPIHT kullanılarak yapılan sıkıştırmanın orijinal ve geri çatlınmış model arasındaki *ortalama uzaklık* göz önüne alındığında aynı uzaklık için daha düşük miktarda veri büyüklüğüne sahip olduğu fakat *Hausdorff uzaklığı* bakımından biraz daha kötü olduğu görülmüştür.

5. Kaynaklar

- [1] P. Alliez and C. Gotsman, "Recent advances in compression of 3D meshes", In *Advances in Multiresolution for Geometric Modelling*, N.A. Dodgson, M.S Floater and M.A. Sabin (eds), Springer-Verlag, 2005.
- [2] F. Moran and N. Garcia, "Comparison of wavelet-based three-dimensional model coding techniques", *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, Vol. 14, No. 7, pp. 937-949, 2004.
- [3] J. Peng, C.-S. Kim, Kuo, and C.-C. Jay, *Technologies for 3D triangular mesh compression: A survey*, Technical Report, University of Southern California, 2003.
- [4] X. Gu, S. Gortler, H.Hoppe, "Geometry Images", *ACM SIGGRAPH* pp.355-361, 2002.
- [5] I. Guskov, W. Sweldens and P. Schröder, "Multiresolu-



Şekil 3: Homer Simpson modelinin (a) 9.41 KB SPIHT bit dizgisi and (b) 41.8 KB MPEG bit dizgisi ile geri çatlınmış hali.

tion Signal Processing for Meshes", *Proc. of ACM SIGGRAPH*, pp. 325-334, 1999.

- [6] K. Köse, A. E. Çetin, U. Gündükbay, L. Onural, "Non-rectangular wavelets for multiresolution mesh analysis and compression", *Proc. of SPIE Defense and Security Symposium, Independent Component Analysis, Wavelets, Unsupervised Smart Sensors, and Neural Networks IV*, Vol. 6247, pp. 19-30 2006.
- [7] P. Cignoni, C. Rocchini, and R. Scopigno, "Metro: measuring error on simplified surfaces", *Computer Graphics Forum*, Vol. 17, No. 2, pp. 167-174, 1998.
- [8] N. Aspert, D. Santa-Cruz and T. Ebrahimi, "MESH: Measuring Error between Surfaces using the Hausdorff distance", *Proc. of the IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME)*, Vol. 1, pp. 705-708, 2002.
- [9] A. Said and W.A. Pearlman, "A new fast and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees", *IEEE Trans. Circ. Syst. Video Tech.*, Vol. 6, pp. 243-250, 1996.
- [10] J.M. Shapiro, "Embedded image coding using zerotrees of wavelets coefficients", *IEEE Trans. Signal Processing*, Vol. 41, pp. 3445-3462, 1993.
- [11] gzip (GNUzip) Compression Software, <http://www.gzip.org>.
- [12] J. Ziv and A. Lempel. "A universal algorithm for data compression." *IEEE Trans. on Information Theory*, Vol. 23, No. 3, pp. 337-343, 1977.
- [13] K. Köse, A. E. Çetin, U. Gündükbay, L. Onural, "Dikdörtgensel olmayan dalgacık dönüşümüne dayalı çok çözünürlüklü üç boyutlu model analizi ve sıkıştırılması", *IEEE Sinyal İşleme ve Uygulamaları Kurultayı (SIU)*, 2006.