

Dikdörtgensel Olmayan Dalgacık Dönüşümüne Dayalı Çok Çözünürlüklü Üç Boyutlu Model Analizi ve Sıkıştırılması* (Nonrectangular Wavelets for Multiresolution Mesh Analysis and Compression)

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

Özetçe

Bu bildiride dikdörtgensel olmayan dalgacık dönüşümüne dayalı çok çözünürlüklü üç boyutlu model analizi ve sıkıştırılması için bir uygulama önerilmektedir. Bu uygulama Sıradüzensel Ağaç Yapılarının Kümelere Bölüntülenmesi (Set Partitioning In Hierarchical Trees - SPIHT) tekniğine dayanmaktadır. Üç boyutlu modeller düzenli ızgara yapıları üzerinde iki boyutlu imgelere dönüştürülmekte, imgeye dayalı gösterim dalgacık dönüşümünden geçirilmekte ve ortaya çıkan dalgacık kümesi verisi SPITH yöntemi uygulanarak bit dizgisine dönüştürülmektedir. Elde edilen bit dizgisinin değişik uzunluklarda bölümlerinden modelin değişik çözünürlüklerde versiyonlarını geri çözmek mümkün olduğundan önerilen yöntem modellerin aşamalı gösterimine olanak sağlamaktadır.

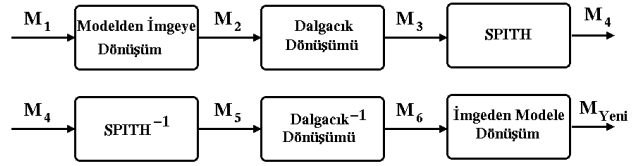
Abstract

We propose a new Set Partitioning In Hierarchical Trees (SPIHT) based mesh compression framework. The 3D mesh is first transformed to 2D images on a regular grid structure. Then, this image-like representation is wavelet transformed and SPIHT is applied on the wavelet domain data. The 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. Nearly perfect reconstruction is possible if all of the data stream is received.

1. Giriş

Literatürde birçok üç boyutlu model sıkıştırma ve analiz etme uygulaması bulunmaktadır [1, 2, 3]. Bu yöntemlerin neredeyse hepsi doğrudan üç boyutlu modelin üzerinde uygulanmaktadır. Bu durum yöntemlerin üç boyutlu veriye uyarlanmasını gerektirmektedir. Burada önerilen yöntem sayesinde üç boyutlu model düzenli ızgara yapıları üzerinde iki boyutlu imgelere dönüştürülerek, üzerlerinde sinyal işleme yöntemlerinin doğrudan kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Önerilen yöntemin blok diyagramı Şekil 1'de görülmektedir.

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



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

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

Sinyal işleme yöntemlerini üç boyutlu modellerde uygulamanın iki değişik yolu daha bulunmaktadır. Bunlardan biri modelin parameterize edilmesi diğeri ise sinyal işleme yöntemlerinin üzerlerinde oynanarak üç boyutlu modeller üzerinde kullanılabilir hale getirilmesidir. Bunların ikisinde zor işlemlerdir. Üç boyutlu modelin imgelere indirgenmesi ise basit bir işlem olup imge ve video işleme yöntemlerinin direk olarak uygulanabilmesine olanak sağlar.

Bu bildiri şu şekilde organize edilmiştir. Üç boyutlu verinin dönüştürülmesi ve sıkıştırılması ile ilgili yöntemler 2. bölümde, burada bahsedilen teknik ile diğer tekniklerin karşılaştırılması 3. bölümde, benzetimler ve sonuçların karşılaştırılması 4. bölümde ve vargılar 5. bölümde verilmektedir.

2. Üç boyutlu Modelin Sıkıştırılması Uygulaması

Üç boyutlu modeller düzensiz örneklenmiş ayrık sinyallerdir. Sinyalin değerleri sadece poligon köşelerinin bulunduğu yerlerde tanımlıdır. Burada bahsedilen yöntem sayesinde üç boyutlu modeller düzenli ızgara yapıları kullanılarak,

düzenli örneklenmiş sinyallere dönüştürülmekte, dalgacık dönüşümü Sıradüzensel Ağaç Yapılarının Kümelere Bölüntülenmesi (Set Partitioning In Hierarchical Trees - SPIHT) kullanılarak sıkıştırılmaktadır. Modelin geri çatılması işlemlerin terslerinin uygulanması ile sağlanır.

2.1. İklendirme ve Izgara Yapıları Üzerine İzdüşümü

İlk olarak üç boyutlu modelin köşe koordinatları her ekseninde $[-0.5, 0.5]$ aralığına normalize edilir, böylece model merkezi orijinde olan kübün içine ölçeklenmiş olur. Daha sonra modelin köşe sayısına bakılarak, modelin izdüşümünün alınacağı imgelerin piksel sayıları belirlenir. Kullanılan izdüşüm düzlemleri ızgara_aralığı parametresi ile belirlenen aralıklarla örneklenmiş birim karelerdir. Düzlemin her ekseninden N örnek alınması durumunda, her düzleme çakışma olmadan en fazla N^2 köşe sığdırılabilir. Her piksel ızgara düzlemde bir kesişimi temsil etmektedir. Köşe-piksel ilişkisi

$$[\mathbf{p}_p / \text{ızgara_aralığı}] \quad (1)$$

denklemlerle belirlenir. Burada \mathbf{p}_p normalize edilmiş köşe koordinatları olan $\mathbf{p} = [p_x, p_y, p_z] \in R^3[-0.5, 0.5]^3$ 'ün daha önceden seçilmiş olan düzlemlere ortogonal projeksiyonlarıdır. Bir imgenin içereceği piksellerin arasındaki uzaklık

$$1/N_{\text{ızgara_aralığı}} \quad (2)$$

denklemlerle belirlenir. Buradaki $N_{\text{ızgara_aralığı}}$ değeri ise

$$\sqrt{M} \cdot \text{detay_seviyesi}, \quad \text{detay_seviyesi} \in R > 1 \quad (3)$$

denklemlerle belirlenir. Burada M modelin içindeki köşe sayısıdır.

İmgedeki bütün pikseller ızgara_aralığı değeri kullanılarak indekslenirler. Izgara kesişimlerinin koordinatları

$$\mathbf{x}_n = \mathbf{V}\mathbf{n}, \quad \mathbf{n} = [\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2], n_i \in Z \quad (4)$$

denklemlerle bulunur. Burada \mathbf{x}_n değeri, $\hat{\mathbf{n}}_1, \hat{\mathbf{n}}_2$ taban vektörlerinden oluşan koordinat düzleminde köşelerin gösterimi ve \mathbf{V} ise düzlemin örnekleme matrisidir. Bir köşenin koordinatlarını gösteren $\mathbf{p} = [p_x, p_y, p_z] \in R^3[-0.5, 0.5]$ değerlerinin \mathbf{n} düzlemine dikgen izdüşümü alınır. Sonuçta ortaya çıkan değer $\mathbf{p}_p = \mathbf{p} \cdot \mathbf{n}$ yani köşe koordinatlarının dik izdüşümüdür. \mathbf{p}_p vektörünün $\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2$ değerleri, en yakın ızgara kesişim noktasının $\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2$ değerlerine eşittir. Bütün köşeler bu işlem ile bir piksele atanmaya çalışılır. İmge üzerindeki \mathbf{p}_p ile gösterilen piksellerin değerleri

$$[\mathbf{p} \cdot \mathbf{m}], \quad \mathbf{m} = \mathbf{n}_1 \times \mathbf{n}_2 \quad (5)$$

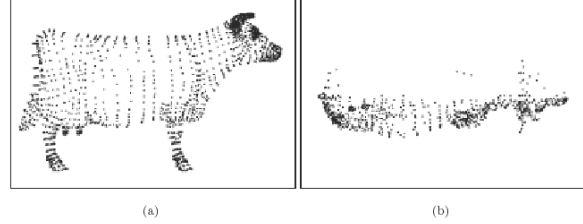
denklemlerle bulunur.

Yukarıdaki anlatılan işlemler uygulanarak üç boyutlu modeller iki boyutlu imgelere dönüştürülürler. Bu dönüştürme sırasında kullanılacak imge sayısı arttırılırsa orijinale daha yakın bir geri çatılma sağlanır. Çünkü, bu durumda daha az kaybolan köşe olacağından daha az aradeğerleme yapmak gereksinimi olur. Fakat bu durum sıkıştırma oranında düşüğe neden olur.

Yukarıda bahsedilen imgeler dışında, her izdüşüm imgesi için birde hangi pikselin hangi köşeye ait olduğunun bilgisini tutan ikinci bir imge bulunmaktadır. Bu imgenin de oluşturulmasında yukarıda bahsedilen yöntemler kullanılır. Sadece piksel değerleri olarak (5) yerine köşe numaraları yazılır.

2.2. Üç boyutlu Modellerin İmge Benzeri Gösterimleri

İzdüşümü safasının sonucunda üç boyutlu model iki boyutlu imgeler haline gelir. Oluşan imgelerin en önemli özelliği büyük bölümlerinin boş yani sıfır olmasıdır. En fazla M yani köşe sayısı kadar piksel sıfırdan farklı olabilir. Bu tür imgeler çok çözünürlüklü analiz sonucunda büyük sıfır-ağaçları meydana getirmelerinden dolayı, SPIHT ile sıkıştırılmaya çok uygundur. Köşelerle ilişkilendirilemeyen piksellere önemsiz pikseller denir. Örnek bir üç boyutlu modelin imge şeklindeki gösterimi Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2: İnek modelinin imge benzeri gösterimi. (a) XY düzlemi üzerine izdüşümü; (b) XZ düzlemi üzerine izdüşümü.

2.3. İmgelerin Sıkıştırılması

Üç boyutlu model burada önerilen yöntem ile iki adet imgeye döndürülür ve bu imgelerde SPIHT kullanılarak bit dizileri haline getirilirler. Bu işlem sırasında üzerinde karar verilmesi gereken iki konu, bit dizisinin ne kadarlık bir kısmının alınacağı ve kaç katmanlı bir çok çözünürlüklü analize başvurulacağıdır.

Daha az uzunlukta bit dizilerinin geri çatılmada kullanılması geri çatılan üç boyutlu modelde daha fazla bozulmaya neden olacaktır, ama daha iyi bir sıkıştırma oranı sağlayacaktır. Çok çözünürlüklü analizde daha fazla katman kullanmak ise daha iyi bir sıkıştırma sağlanmasına karşılık, daha fazla hesaplama gücü harcanmasını gerektirmektedir.

Geri çatılan üç boyutlu modeldeki bozulma miktarı görsel olarak ya da METRO [4] gibi bazı araçlar kullanılarak ölçülebilir. Burada kullanılan METRO isimli program Hausdorff Uzaklığı ölçütünü kullanmaktadır.

Bit dizisinin ne kadarlık bir kısmının alınması gerektiği konusu, dikgen izdüşümü sırasında kullanılan detay_seviyesi parametresi ile yakından ilişkilidir. Eğer bu parametre düşük ise, daha az bozulmalı bir geri çatılma için bit dizisinin daha büyük bir kısmı alınmalıdır. Buradaki önemli konulardan birinden bit dizisinin sonundaki bitlerin sıfırlanması baştaki bitlerin sıfırlanmasına göre daha az bozulmaya neden olurlar. Bu SP-ITH kodlamasının doğal bir sonucudur [5, 6].

Önerilen yöntemde, çok çözünürlüklü analizde gidilebilecek en son katmana kadar gidilmemektedir. Çünkü, imge verisi çoğunlukla önemsiz piksellerden oluşmakta ve bundan dolayı daha yukarı katmanlardan başlayarak daha büyük sıfır-ağaçları bulma olasılığı artmaktadır.

SPIHT kullanılarak elde edilen bit dizisi daha sonra aritmetik kodlama ile sıkıştırılır. Burada bahsedilen uygulamada gzip yazılımı kullanılmıştır [7]. Bu yazılım Lempel-Ziv kod-

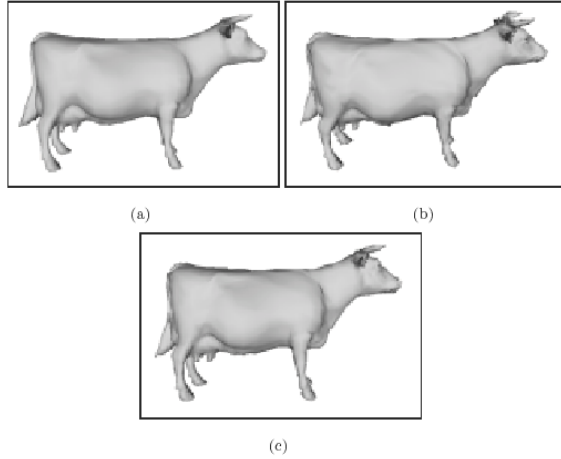
lama algoritmasının [8] bir gerçekleştirimidir. Üç boyutlu modelin orijinal hali ve SPIHT ile kodlanmış halleri *gzip* yazılımı ile sıkıştırılmış ve karşılaştırmalar bu halleri üzerinden yapılmıştır.

2.4. İmgelerden Üç boyutlu Modellerin Geri Çatılması

Üç boyutlu modeller SPITH tarafından oluşturulan bit dizgileri ve kullanılan dalgacık dönüşümü tabanı, köşe indeksleri (ikinci kanal), detay_seviyesi sabiti v.b. gibi bazı diğer bilgiler kullanılarak geri çatılırlar. Fakat şu göz önünde tutulmalıdır ki yan bilgilerin veride kapladıkları alan geometrik veriye göre daha azdır.

Bit dizisi SPIHT kodlamasının tersi kullanılarak yeniden imgelere dönüştürülür. Daha sonra ise iki kanalda kullanarak üç boyutlu uzaya geri izdüşümü alınır. Burada kullanılan verinin daha önceden nicemlenmiş (quantized) olduğu göz önüne alındığında tam bir geri çatılmanın olamayacağı kesindir.

Üç boyutlu modelin bazı köşeleri, model imgeye dönüştürülürken çakışmış ve kaybolmuş olabilirler. Burada kaybolan bilgiyi toparlamanın iki yolu vardır. Bunlardan ilki diğer izdüşümü imgelerinde bu köşeleri aramaktır. Eğer bundan sonuç alınmaz ise kaybolan köşenin aradeğerlemesine başvurulur. Bu işlem köşenin koordinatlarının komşuları kullanarak kestiriminin yapılmasıdır. Komşuların bulunması işlemi ise üç boyutlu modelin bağlantırlık (connectivity) verileri kullanılarak yapılır. Şekil 3'de üç boyutlu bir modelin orijinal (a) ve farklı uzunluklardaki bit dizilerinden geri çatılmış halleri (b-c) gösterilmektedir.



Şekil 3: (a) Orijinal model (27KB); (b) 9.1KB bit dizisi kullanılarak geri çatılmış model; (c) 10.4KB bit dizisi kullanılarak geri çatılmış model.

3. Sunulan Yöntem ile Varolan Diğer Yöntemlerin Karşılaştırılması

Tek hızlı sıkıştırma yöntemini kullanan uygulamalarda üç boyutlu model verisi iletimden önce tamamen sıkıştırılıp iletilir. Aşamalı sıkıştırma kullanan yöntemlerde ise üç boyutlu model düşük çözünürlükte bir model ve onun güncellemeleri

olarak kodlanır ve iletilir. Bu sayede alıcı gelen parçaları birbirinden artımlı olarak açar ve modeli aşamalı olarak yeniden oluşturabilir. Burada bahsedilen yöntem üç boyutlu modeli baştan bir bütün olarak sıkıştırması bakımından tek hızlı sıkıştırmaya, ama gelen parçaların artımlı olarak açılabilmesinden dolayı da aşamalı sıkıştırmaya benzemektedir.

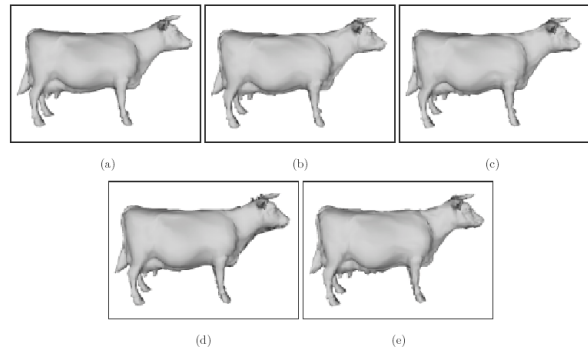
SPIHT tarafında meydana getirilen bit dizgisinin sıradüzel bir yapısı vardır. L uzunluğundaki bir bit dizgisinden alınan ilk l bitten sonra üç boyutlu model bozulmalara sahip bir halde geri çatılabilir. Daha sonradan gelen yeni bitler sayesinde de model güncellenebilir. Bu özelliği nedeniyle bu uygulama aşamalı üç boyutlu model sıkıştırma tekniğidir.

Çoğu aşamalı model sıkıştırma yöntemleri kodlayıcı tarafında kenar çökertme ve kodçözücü tarafında ise köşe noktası ayırma işlemini uygulayarak modelin farklı çözünürlüklerde temsillerini elde ederler [9]. Modeli temsil etmek için kullanılan köşe noktası sayısı azaldıkça modelin çözünürlüğüde düşer [10]. Burada bahsettiğimiz yöntemde ise kullanılan bit dizgisi uzunluğu modeli temsil etmek için kullanılan köşe noktası sayısı ile değil bu noktaların üç boyutlu uzaydaki yerleriyle oynamaktadır. Daha uzun bit dizgileri kullanmak köşe noktalarını orijinal yerlerine daha yakın bir şekilde yerleştirilmesini sağlar. Bu nedenle buradaki üç boyutlu modelin kalitesinde meydana gelen düşüşün sebebi köşe noktalarının kesin olmayan şekilde uzayda yerleştirilmesidir. Daha sonradan gelen bit dizgileri köşe noktalarının koordinatlarının ince ayarlanmasını sağlarlar.

4. Sonuçlar

Bu bildiride sunulan uygulama Matthias Müller'den (ETH Zürich) alınan inek modeli üzerinde test edilmiştir. Orijinal modelin büyüklüğü 27.2 KB'dir.

Tablo 1 ve Şekil 4'de değişik dalgacık temelleri ve bit dizgisinin değişik miktarları kullanılarak yapılan testlerin sonuçları bulunmaktadır. Nicemlenmiş model ile kastedilen sadece izdüşüm operasyonundan geçirilmiş üç boyutlu modelin SPITH kodlaması ve kodçözümlemesi uygulanmadan geri çatılmış halidir.



Şekil 4: detay_seviyesi olarak 3 ve bitdizgisinin % 60'ı kullanılarak geri çatılan model. (a) Lazy, (b) Haar, (c) Daubechies-4, (d) Biorthogonal-4.4 ve (e) Daubechies-10 dalgacık dönüşü temeli kullanılarak elde edilen modeller.

Dalgacık Temeli	Bit Dizgisi (%)	Detay Seviyesi	Veri Uzunluğu (KB)	Orjinal - Nicemlenmiş Hausdorff Uzaklığı	Orjinal - Geriçatılmış Hausdorff Uzaklığı
Lazy	40	3.0	9.51	0.0139930	0.014547
Lazy	60	3.0	10.4	0.0139930	0.014219
Haar	40	3.0	11.5	0.0139930	0.016085
Haar	60	3.0	13.8	0.0139930	0.014102
Daubechies-4	40	3.0	12.0	0.0139930	0.018778
Daubechies-4	60	3.0	15.1	0.0139930	0.014661
Daubechies-10	40	3.0	12.1	0.0139930	0.014194
Daubechies-10	60	3.0	15.2	0.0139930	0.045020
Biorthogonal-4.4	60	4.0	16.0	0.009446	0.014549

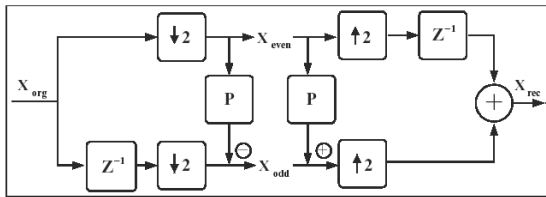
Tablo 1: İnek modeli için sıkıştırma sonuçları

5. Vargılar ve Gelecek Planları

Bu bildiriye, SPIHT kodlaması kullanılarak üç boyutlu model sıkıştırılması üzerine bir uygulama önerilmiştir. Üç boyutlu model ilk önce iki boyutlu sinyallere dönüştürülmüş ve daha sonra da dalgacık dönüşümünden geçirilmiştir. Bu iki boyutlu sinyal diktörtgenel ya da quincunx ızgaralar üzerinde tanımlanabilir. Dalgacık dönüşümünden geçirilmiş veri daha sonra SPIHT tekniğiyle kodlanmaktadır. Sonuçta ortaya çıkan bit dizgisi aşamalı kod çözümüne uygundur.

Sinyal örneklerinin ilintili olması SPIHT kodlamasının daha başarılı olmasını sağlar. Bu nedenle iki boyutlu sinyal örneklerinin birbirleriyle daha ilintili olmasını sağlayan bir izdüşümü tekniği kullanılması daha iyi sıkıştırma oranları sağlamanın bir yoludur. Gelecekte üç boyutlu modeli izdüşümünü almadan doğrudan üç boyutlu SPIHT ile kodlanması denenecektir.

Ayrıca uyarlamalı bir dalgacık yapısının [11] kullanılmasının "lazy filterbank" kullanan dalgacık dönüşümünden daha iyi sonuçlar vermesi beklenmektedir. Uyarlamalı öngörmeli lifting dalgacık dönüşümü (adaptive predictor in the lifting wavelet transform) kullanılabilir. Veri örneklerinin ayrık olduğu yerlerde bu yöntem işe yaramasa da sık veri örneği olan yerlerde kazanç sağlayacaktır. Burada kullanılan inek modelinin kulak kısımları gibi bölgelerde veri örneği miktarı çok ve birbirleriyle ilintilidir. Bu nedenle örnekleri birbirlerinden öngörmek mümkündür. Örnek bir uygulama Şekil 5'de gösterilmektedir.



Şekil 5: Uyarlamalı öngörmeli lifting dalgacık dönüşümü yapısı kullanılan model.

6. Kaynakça

- [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] P. Cignoni, C. Rocchini, and R. Scopigno, "Metro: measuring error on simplified surfaces", *Computer Graphics Forum*, Vol. 17, No. 2, pp. 167-174, 1998.
- [5] 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.
- [6] J.M. Shapiro, "Embedded image coding using zerotrees of wavelets coefficients", *IEEE Trans. Signal Processing*, Vol. 41, pp. 3445-3462, 1993.
- [7] J.-L. Gailly, *gzip Compression Software*.
- [8] J. Ziv and A. Lempel. "A universal algorithm for data compression." *IEEE Trans. on Information Theory*, Vol. 23, No. 3, pp. 337-343, 1977.
- [9] R. Pajarola and J. Rossignac, "Compressed progressive meshes", *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 6, No. 1, pp. 79-93, 2000.
- [10] M. Garland and P. Heckbert, "Surface simplification using quadric error metrics", *Proc. of ACM SIGGRAPH'97*, pp. 209-216, 1997.
- [11] Ö. N. Gerek and A. E. Çetin, "Adaptive Polyphase Subband Decomposition Structures for Image Compression," *IEEE Trans. on Image Processing*, pp. 1649-1660, 2000.