

Ölçülmüş ÇYDF Verilerinin Lafortune Modeli ile Etkin Gösterimi

Efficient Representation of Measured BRDF Data using Lafortune Model

Şükrü Ozan¹, Şevket Gümüştekin¹

1.Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Gülbahçe

sukruozan,sevketgumustekin@iyte.edu.tr

Özetçe

Çift yönlü yansımaya dağılım fonksiyonu (ÇYDF), bir malzemenin görünüşünü, ışığın malzeme yüzeyi ile gerçekleştirdiği etkileşim ile tanımlamaktadır. Bu çalışmada, Lafortune analitik yansımaya dağılımı modeli, sık biçimde örneklenerek ölçülmüş ÇYDF verilerine, Levenberg - Marquardt Algoritması kullanılarak oturtulmuştur. Fiziksel tabanlı bir ışın izleme yazılımı ile elde edilen sonuçlar görselleştirilmiş ve sunulan yöntemin analizi yapılmıştır.

Abstract

The bi-directional reflectance distribution function (BRDF) describes the appearance of a material by its interaction with light. In this study, Lafortune BRDF model is fitted to densely sampled measured BRDF data by using Levenberg - Marquardt Algorithm. The obtained results are visualised by a physically based ray tracing software and the proposed method is analysed.

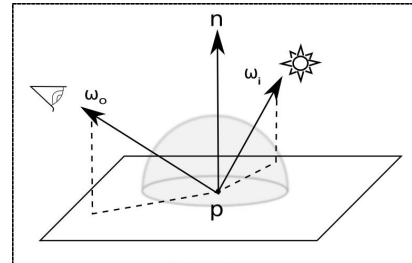
1. Giriş

Fiziksel tabanlı gerçekçi görsel giydirmeye Bilgisayar Grafiği alanında yaygınlaşan bir konudur. Gerçekçi bir görsel giydirmeye sürecinde en önemli unsur, malzemelerin ışık ile etkileşiminin oluşturacağı görsel etkinin doğru şekilde tanımlanabilmesidir. Çift yönlü yansımaya dağılım fonksiyonu (ÇYDF), malzemenin görüntüsünü, ışık ile olan etkileşimiyle tanımlar. ÇYDF'nin ölçülmesi zahmetli ve uzun bir işlemdir. Genellikle bir gonioreflektometre kullanılarak geniş bir ışık spektrumunda ölçülürler. [1]'de bir robot kola yerleştirilmiş reflektrometre kullanılarak yapılan bir ÇYDF ölçme sistemi sunulmuştur. Bunun dışında imgeye dayalı ölçme teknikleri de kullanılmaktadır ([2], [3] ve [4]). Özellikle [2]'de sunulan sistem sayesinde çok kapsamlı bir yönbağımsız ÇYDF veritabanı oluşturulmuştur. Ölçüm imgeye dayalıdır ve ışık spektrumunun üç dalga boyunu (kırmızı, yeşil, mavi ya da KYM) kapsamaktadır. Bu veritabanı hem dahilindeki malzeme çeşitliliği hem de ölçülen verilerin yoğunluğu bakımından en kapsamlı ve en yaygın kullanılan veritabanlarından birisidir. Bu veritabanında 100 malzemeye ait yüksek hassasiyetle ölçülmüş ÇYDF verisi bulunmaktadır. Veritabanı, gelen ve giden ışık yönündeki birim vektörlere göre KYM kanallarına ait ÇYDF değerlerini içermektedir. Bu çalışmada da bu veritabanı baz alınmıştır.

ÇYDF verileri, görsel giydirmeye süreçlerinde doğrudan kullanılabilir. İyi bir sonuç elde etmek için kullanılan verinin yoğun biçimde örneklenmiş olması ve malzemenin yansıtıcı özelliklerini kapsamlı bir şekilde tanımlaması gerekmektedir. Bu da verinin bilgisayar hafızasında büyük bir yer tutmasına neden olmaktadır. Örnek olarak [5] çalışmasında görsel giydirmeye süreçlerinde doğrudan kullanılan ölçülmüş ÇYDF'ler hafızada her bir malzeme için yaklaşık 34 MB'lık bir alan kaplamaktadır. Benzer şekilde [6] çalışmasında önerilen yöntem de malzemeye bağlı olarak hafızada 150 ile 400 KB arasında bir alan kaplamaktadır. Bu tarz yöntemler kullanıldığında, özellikle birden çok malzemenin bulunduğu karmaşık sahnelerin gerçekleşmesi, alışlagelmış kişisel bilgisayarlarda neredeyse imkansız olmaktadır. Analitik yansımaya dağılımı modelleri bu bakımdan önem kazanmaktadır. Çalışmamızda, ölçülmüş ÇYDF'lerin analitik yansımaya modelleri kullanılarak, az sayıda parametre ile belirli ölçüde ifade edilebilecekleri gösterilecektir. Bir sonraki bölümde yaygın olarak kullanılan bazı analitik yansımaya modelleri verilecektir. Denklemlerde kullanılan simgeler Tablo 1'de listelenmiştir. ÇYDF'nin tanımlanmasında kullanılan model geometrisi Şekil 1 ile gösterilmiştir.

Simge	Anlam
$\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o$	Gelen ve giden ışık yönündeki birim vektörler
$f(p, \vec{\omega}_i, \vec{\omega}_o)$	Çift yönlü yansımaya dağılım fonksiyonu
ρ_d	Yayınık yansıtma
ρ_s	Aynasal yansıtma
p	Yüzey üzerindeki nokta

Tablo 1: Evrensel aydınlatma gösterim tablosu.



Şekil 1: ÇYDF'nin tanımlandığı geometrik yapı.

2. Analitik Yansima Dağılımı Modelleri

Gerek malzemelerin yansıtma özelliklerinin ölçülmesinin zorluğundan, gerekse ölçülmüş verilerin görsel giydirme süreçlerinde doğrudan kullanımının zorluğundan ötürü, analitik yansima dağılımı modelleri Bilgisayar Grafığı alanında 70'li yıllardan itibaren önem kazanmıştır. Phong ÇYDF modeli [7] en eski ve en yaygın olarak kullanılan analitik yansima dağılımı modelidir (Denklem 1). Blinn ÇYDF modeli [8], Phong modelinin geliştirilmiş bir uyarlamasıdır. Denklem 2 ile ifade edilen bu modelde görülen $R(., n)$ operatörü, verilen bir vektörün yüzey normali etrafında istenilen şekilde döndürülmesini sağlamaktadır. Modellerin matematiksel ifadeleri, gelen ışık yönüne bağlı olarak oluşacak yansima yönünde, boyutu e üstel parametresi ile değişebilen bir kosinüs lobu oluşturmaktadır. Bu yapı uygun parametreler seçildiğinde yansıtıcılığı yüksek malzemelere ait ölçülmüş bir ÇYDF'yi bir dereceye kadar ifade edebilmektedir. Kompakt yapıları hesaplama kolaylığı sağlamaktadır. Ancak bu modellerin ölçülmüş ÇYDF değerlerine oturtulması yeterince iyi sonuç vermemektedir.

Denklem 3'te verilen Lafortune modeli bir önceki modellerden farklı olarak yayınık yansımaya karşılıyan bir parametre, ρ_d , bulundurmaktadır. [9]'da belirtildiği üzere, analitik modellere eklenecek ek kosinüs lobları, modelin özellikle yansıtıcılığı yüksek malzemelere ait ölçülmüş değerlere oturtulmasında daha iyi sonuç vererek hata payını azaltmaktadır. Denklemde yer alan n , modelde kullanılan kosinüs lobu sayısını belirtmektedir.

Phong ÇYDF Modeli:

$$f_r(p, \omega_o, \omega_i) = (\omega_o \cdot (-\omega_{ix}, -\omega_{iy}, \omega_{iz}))^e. \quad (1)$$

Blinn ÇYDF Modeli:

$$f_r(p, \omega_o, \omega_i) = (\omega_i \cdot R(\omega_o, n))^e = (\omega_o \cdot R(\omega_i, n))^e. \quad (2)$$

Lafortune ÇYDF Modeli:

$$f_r(p, \omega_o, \omega_i) = \frac{\rho_d}{\pi} + \sum_{i=1}^n (\omega_o \cdot (\omega_{ix} O_{ix}, \omega_{iy} O_{iy}, \omega_{iz} O_{iz}))^{e_i}. \quad (3)$$

3. Analitik Modelin Ölçülmüş Verilere Oturtulması

Matusik'in [5] çalışmasında sunduğu ölçüm tekniği ve bu tekniği kullanarak oluşturduğu veritabanında yüz dolayında ayrı malzeme için ölçülmüş ÇYDF değerleri bulunmaktadır. Bu kısımdaki temel amaç, bir önceki kısımda anlatılan Lafortune analitik ÇYDF modelinin ölçülmüş ÇYDF verilerine oturtulması için bir yöntem sunmaktır.

Yansima dağılımı fonksiyonları yüzey üzerindeki yarımkürede tanımlıdır. Bu yüzden ışık geliş gidiş yönleri ifade edilirken küresel koordinat sistemi kullanılmaktadır (bkz. Şekil 1). Bu çalışmada yansima dağılımları, ışığın geldiği yönü ve ayna yansımaya yönünü gösteren vektörlerin geldiği düzlem (geliş düzlemi) üzerinde incelenmiştir. Analitik fonksiyonların ölçülmüş verilere oturtulması işlemi de bu düzlem üzerinde ele alınmıştır. Ölçüm yöntemi imgeye dayalı olduğundan veriler görünür ışık spektrumu dahilindeki kırmızı, yeşil, mavi (KYM)

kanallarını ifade eden üç dalga boyunu içermektedir. Veritabanında yer alan *yeşil metalik boyanın ve kırmızı plastiğin* ÇYDF ölçüm değerleri örnek olarak seçilmiştir.

Ölçülmüş değerler incelendiğinde özellikle ışığın yüzeyi sıyırdığı açılarda ölçümlerin yüksek derecede gürültü ve hata içerdiği gözlemlenmektedir. Bu yüzden bu açı derecelerini dışarıda bırakacak şekilde, geliş düzleminde, farklı geliş ve gidiş açıları için ÇYDF değerleri bir tabloya aktarılmıştır. Tek loblu, iki loblu ve üç loblu Lafortune modeli, bu veriye, GNU Octave [10] hesaplama programının eniyileme paketi ile oturtulmuştur. Çözüm için Levenberg-Marquardt yöntemi [11], [12] kullanılmaktadır. Bu yöntem doğrusal olmayan fonksiyonların veriye oturtulması için yaygın olarak kullanılan bir doğrusal olmayan bağlanım yöntemidir.

Ölçülmüş ÇYDF değerleri KYM kanalları için ayrı değerler içerdiğinden oturtma işlemi her kanal için ayrı ayrı yapılmıştır. Teorik olarak üç loblu Lafortune modeli için toplam 39 parametrenin eniyilenmesi gerekmektedir. Ölçümlerin yönbağımsız malzemeler için yapılmış olmasından dolayı eldeki veriler de yönbağımsızdır. Bu sebepten, o_{ix} ve o_{iy} ile ifade edilen parametreleri, o_{ixy} şeklindeki tek bir parametre ile ifade etmek mümkündür. Bu durumda parametre sayısı 30'a iner. Denklem 3 baz alınarak, kanallar için K, Y ve M üst indisleri, loblar için 1, 2 ve 3 alt indisleri kullandığında eniyilenmesi gereken parametre listesinin son şekli aşağıdaki gibidir olmaktadır;

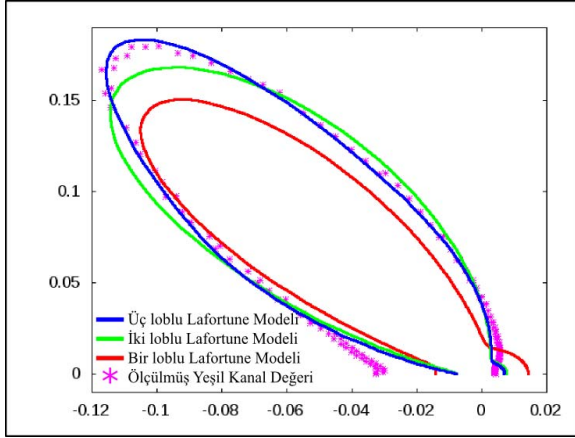
$$\begin{aligned} & \rho_d^K, \rho_d^Y, \rho_d^M \\ & o_{1xy}^K, o_{1xy}^Y, o_{1xy}^M, o_{2xy}^K, o_{2xy}^Y, o_{2xy}^M, o_{3xy}^K, o_{3xy}^Y, o_{3xy}^M \\ & o_{1z}^K, o_{1z}^Y, o_{1z}^M, o_{2z}^K, o_{2z}^Y, o_{2z}^M, o_{3z}^K, o_{3z}^Y, o_{3z}^M \\ & e_1^K, e_1^Y, e_1^M, e_2^K, e_2^Y, e_2^M, e_3^K, e_3^Y, e_3^M \end{aligned}$$

Çalışmamızda, K, Y ve M kanalları için oturtma işlemi ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Bu işlem sonucunda ilgili parametrelerin eniyilenmesi sağlanmıştır. Yeşil metalik boya için yapılmış ÇYDF ölçümlerine bir, iki ve üç loblu Lafortune modeli, yukarıda anlatıldığı şekilde oturtulmuştur. Bu oturtma işleminden sonra elde edilen parametrelerin başarımını test etmek için, gelen ışının yüzey normali ile 30° açı yaptığı durumda yansima düzlemi üzerindeki ÇYDF değerleri ile oturtulmuş analitik fonksiyonların bu düzlemde aldığı değerlerin Y kanalı değerleri Şekil 2'de gösterilmiştir. Benzeri işlem kırmızı plastik malzeme için yapılmış ve K kanalı değerleri Şekil 3'te gösterilmiştir.

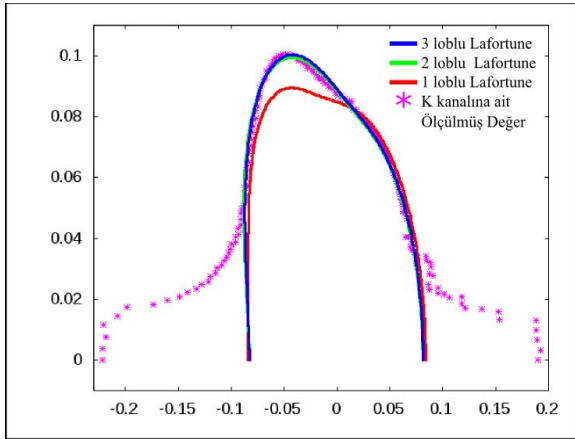
Yeşil metalik boya için, iki ve üç loblu modelin yansima özelliklerini daha iyi biçimde temsil ettiği görülmektedir. Kırmızı plastik malzeme ölçümleri görüleceği üzere tersine yansima ve aynasal olmayan yansima gibi karmaşık özellikler içermektedir. Oturma performansı açısından iki ve üç loblu loblu model bu ölçüm değerleri için de bir loblu modele göre daha iyi sonuç vermektedir ancak malzemenin fiziksel özelliklerini tam olarak temsil edememektedir.

4. Oturtma İşleminin Görsel Sonuçları

Yapılan oturtma işleminin görsel etkisinin daha net görülebilmesi için fiziksel tabanlı bir ışın izleme yazılımı olan *pbri* [13] kullanılmıştır. Gerek oturtma işlemi, gerekse ışın izleme yazılımı kullanılarak yapılan görsel giydirme işlemi, linux işletim sistemi (Ubuntu 9.10) yüklü, 3.2 GB RAM ve 2.3



Şekil 2: Yeşil metalik boyanın Y kanalına ait grafikler.



Şekil 3: Kırmızı plastik malzemenin K kanalına ait grafikler.

GHZ'lik çift çekirdekli işlemciye sahip bir dizüstü bilgisayarda koşulmuştur.

Stanford üniversitesinin taranmış 3B veri deposundan alınmış *Mutlu Buda* figürünün bulunduğu örnek sahne, malzeme olarak ölçülmüş değerler ve oturtulmuş modeller kullanılarak ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Işın izleme aşamasında piksel başına 128 ışın kullanılmıştır. 256x512 büyüklüğündeki imgelerin oluşturulması ortalama 345 saniye sürmektedir. Yeşil metalik boyaya ait ölçülmüş ÇYDF değeri ve oturtulmuş analitik modeller ile gerçekleştirilmiş sahne Şekil 4 ile gösterilmiştir. Sol üstteki görüntü ölçülmüş ÇYDF değeri ile, sağ üstteki görüntü bir loblu Lafortune modeli ile, sol alttaki ve sağ alttaki görüntüler ise sırasıyla iki loblu ve üç loblu Lafortune modeli ile gerçekleştirilmiştir. Analitik modellerle gerçekleştirilmiş her bir görüntü ile ölçülmüş değerlerle gerçekleştirilmiş görüntü arasındaki fark resmi ilgili resmin sağ üst köşesinde ufak bir biçimde gösterilmiştir. Benzeri çalışma kırmızı plastik malzeme için Şekil 5 ile gösterilmiştir.

Bir önceki bölümde gösterilen grafiklerde görülen sonuçlara uygun olarak, yeşil metalik boyada iki ve üç loblu modelin malzemeye ait yansıtıcılık özelliklerini bir loblu mod-

ele göre daha iyi kotardığı görülmektedir. Ölçülmüş değerlerle oluşturulan imge baz alınarak, ışıklılık kanallarına ait doruk sinyal gürültü oranları (DSGO) hesaplandığında iki ve üç loblu modelin başarımının daha yüksek olduğu görülmektedir. Işın izleme aşamasında daha fazla miktarda ışın kullanarak DSGO seviyesinde oransal bir iyileştirme gerçekleştirmek mümkündür. Aynı analiz kırmızı plastik malzeme için yapıldığında analitik modelin oturma performansının daha kötü olduğu gözlemlenmektedir. Şekil 3 ve bu sayısal sonuçlar kullanılan analitik modelin bu malzeme için uygun olmadığını göstermektedir. DSGO ölçümlerine ait bilgiler Şekil 4 ve 5'teki altyazılarda verilmiştir.

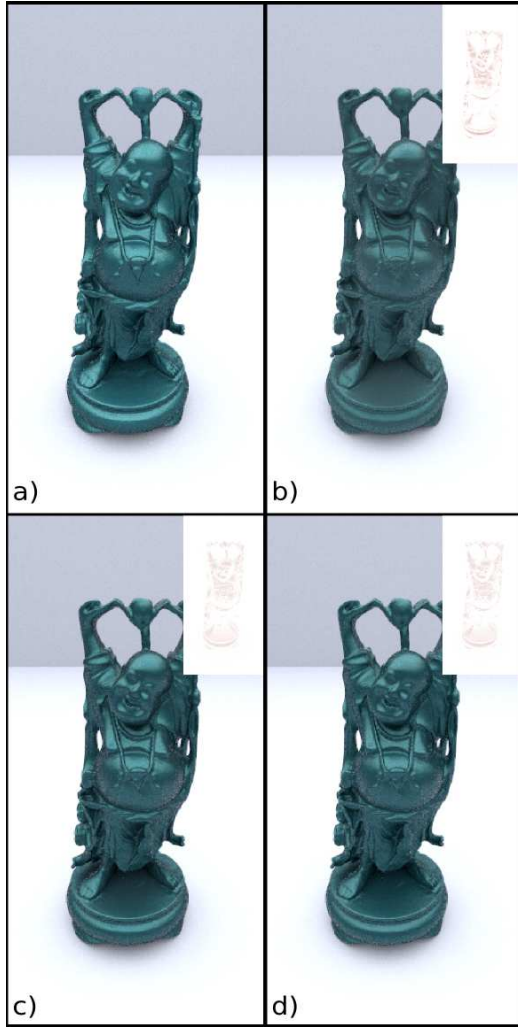
5. Sonuçlar

Bu çalışmada, Lafortune analitik yansıma dağılımı modelinin [9], sık biçimde örneklenmiş ÇYDF verilerine, Levenberg - Marquardt algoritması kullanılarak oturtulması ve bunun sonucunda elde edilen sonuçlar ele alınmıştır. Modelin bir, iki ve üç loblu halleri ayrı ayrı ele alınmıştır. Modelin yansıtıcılığı yüksek malzemelerde iyi sonuç verdiği gözlemlenmektedir. Aynasal olmayan yansıma ve tersine yansıma gibi daha karmaşık fiziksel özellikler içeren malzemelerde ise modelin yetersiz kaldığı görülmektedir.

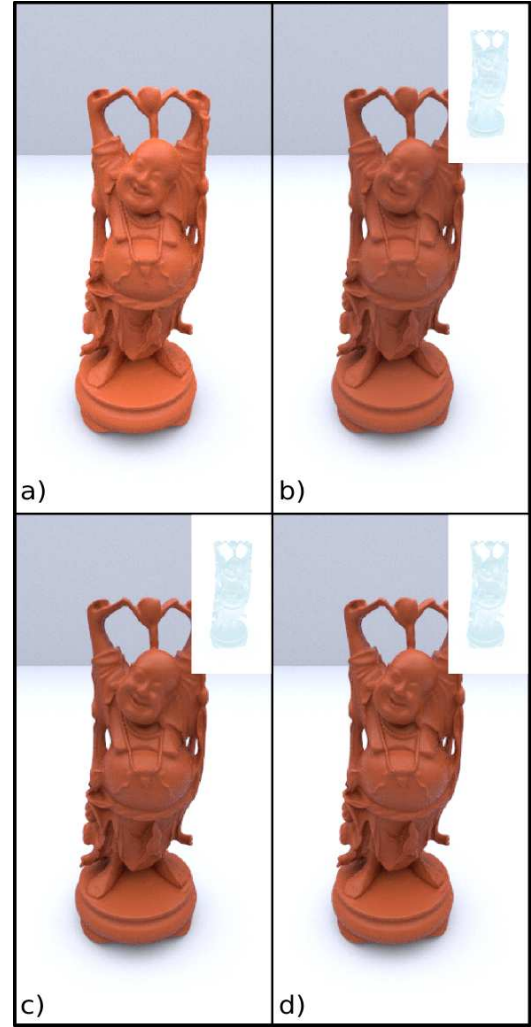
Bunun yanında gerek ölçümden kaynaklanan hataları belirli ölçüde filtreledikleri, gerekse parametrik yapıları sayesinde hafızada çok az yer tuttukları için analitik modeller Bilgisayar Grafiği halen alanında tercih edilmektedir. [5] ve [6] gibi çalışmalarda görüleceği üzere ölçülmüş değerler hafızada büyük yer kaplamaktadır. Bu çalışmada önerilen yöntem ile özellikle yansıtıcılığı yüksek malzemelerin ÇYDF karakteristiğini az sayıda parametre ile ifade etmek mümkündür. Bunun yanında, ayrı bir grupta yer alan fiziksel tabanlı analitik modeller, tersine yansıma ve aynasal olmayan yansıma gibi karmaşık yansıtıcılık özelliklerini daha iyi karşılayabilmektedir. İleriki çalışmalarımızda bu modeller ele alınacak ve kısıtlı eniyileme algoritmaları ile ölçülmüş verilere oturtulduklarında elde edilen sonuç ve başarımlar incelenecektir.

6. Kaynakça

- [1] Höpe A., Hünerhoff D. and Hauer K.O. 2006. "Robot-based Gonioreflectometer" *Industrial Robotics: Programming, Simulation and Application*, December 2006, p.702.
- [2] Matusik W., Pfister H., Brand M. and McMillan L. 2003. "Efficient Isotropic BRDF Measurement" *Proceedings of the 14th Eurographics workshop on Rendering*, 2003, p.241-247.
- [3] Marschner S.R., Westin S.H., Lafortune E.P.F. and Torrance K.E. 2000. "Image-Based Bidirectional Reflectance Distribution Function Measurement" *Applied Optics*, Volume 39 Issue 16, June 2000, p.2592-2600.
- [4] Marschner S.R., Westin S.H., Lafortune E.P.F., Torrance



Şekil 4: a) Ölçülmüş ÇYDF ile oluşturulmuş görüntü b) Bir loblu Lafortune modeli ile oluşturulmuş görüntü (DSGO = 29.27 dB) c) İki loblu Lafortune modeli ile oluşturulmuş görüntü (DSGO = 31.44 dB) d) Üç loblu Lafortune modeli ile oluşturulmuş görüntü (DSGO = 31.02 dB)



Şekil 5: a) Ölçülmüş ÇYDF ile oluşturulmuş görüntü b) Bir loblu Lafortune modeli ile oluşturulmuş görüntü (DSGO = 28.12 dB) c) İki loblu Lafortune modeli ile oluşturulmuş görüntü (DSGO = 27.56 dB) d) Üç loblu Lafortune modeli ile oluşturulmuş görüntü (DSGO = 27.81 dB)

- K.E., and Greenberg D. P. 1999. "Image-based BRDF Measurement Including Human Skin" *AIN Proceedings of 10th Eurographics Workshop on Rendering, Granada Spain*, June 1999, p.139-152.
- [5] Matusik W., Pfister H., Brand M. and McMillan L. 2003. "A Data-Driven Reflectance Model" *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2003, p.759-769.
- [6] Lawrence J., Rusinkiewicz S., Ramamoorthi R. "Efficient BRDF importance sampling using a factored representation" *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Volume 23 Issue 3, 2004, p.496-505.
- [7] Phong B.T. 1975. "Illumination for Computer Generated Pictures" *Communications of the ACM*, 1975, Volume 18 Issue 6, 1975, p.311-317.
- [8] Blinn J.F. 1977. "Models of Light Reflection for Computer Synthesized Pictures" *Proceedings of SIGGRAPH'77*, 1977, p.192-198.

- [9] Lafortune E.P.F, Foo S., Torrance K. E. and Greenberg D.P. 1997. "Non-Linear Approximation of Reflectance Functions" *International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, 1997, p. 117-126.
- [10] Eaton J.W. 2002. "GNU Octave Manual" *Network Theory Limited 2002*, 2002.
- [11] Levenberg, K. "A Method for the Solution of Certain Problems in Least Squares" *Quart. Appl. Math.* 2, 1944, p.164-168.
- [12] Marquardt D. "An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters" *SIAM J. Appl. Math.* 11, 1963, p.431-441.
- [13] Pharr M. and Humphreys G. 2004. "Physically Based Rendering: From Theory to Implementation" *Morgan-Kaufmann Publishers*, 2004, 2004.