

YDA Görüntüler İçin Gölgeleme Giderme Algoritmalarının Karşılaştırılması

Evaluating Deghosting Algorithms for HDR Images

Okan Tarhan TURSUN¹, Ahmet Oğuz Akyüz¹, Aykut ERDEM², Erkut ERDEM²

¹Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
Orta Doğu Teknik Üniversitesi
{tarhan, akyuz}@ceng.metu.edu.tr

²Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
Hacettepe Üniversitesi
{aykut, erkut}@cs.hacettepe.edu.tr

ÖZETÇE

Gerçek hayat koşullarında görüntülenen sahnelerdeki ışınım yeğinliği büyük değişkenlik gösterebilir. Işınım yeğinliğindeki değişkenliği doğru bir şekilde yakalamak için Yüksek Dinamik Aralıklı (YDA) görüntüleme teknikleri kullanılmaktadır. Bu tekniklerin bir kısmı aynı sahnenin farklı pozlama süreleriyle çekilmiş Düşük Dinamik Aralıklı (DDA) birden fazla görüntüsünü girdi olarak alarak bir YDA görüntü üretmeyi temel alır. Görüntüleme ve birleştirilme işlemi sırasında DDA görüntülerin arasında kamera ve sahnedeki objelerin hareketinden doğabilecek farklılıkların, kullanılan YDA oluşturma yöntemi tarafından doğru bir şekilde çözümlenmesi gerekir. Bu çalışmada bu probleme yönelik olarak son yıllarda önerilen iki yaklaşım, değişik zorlukta resim dizilerinden oluşacak şekilde ürettiğimiz bir veri kümesinde, nesnel ve öznel değerlendirme ölçütleri temel alınarak sınanmış ve sonuçları paylaşılmıştır.

ABSTRACT

The real world encompasses a high range of luminances. In order to capture and represent this range correctly, High Dynamic Range (HDR) imaging techniques are introduced. Some of these techniques are based on constructing an HDR image from several Low Dynamic Range (LDR) images with different exposures. In the capture and reconstruction phases, the HDR reproduction techniques must resolve the differences between the input LDR images due to camera and object movement. In this study, two recent approaches addressing this issue are compared using a novel dataset comprised of image sequences with varying complexity. The results are evaluated by using both objective and subjective measures.

1. GİRİŞ

Hem amatör hem de profesyonel amaçlı görüntüleme işlemlerinde, gerçek dünyadaki bir sahnede yer alan ışınım yeğinliği büyük değişkenlik gösterebilir. Düşük Dinamik Aralıklı (DDA) şeklinde tabir edilen geleneksel görüntüleme donanımlarının becerileri, aynı sahnede doğru bir şekilde yakalanabilecek en düşük ve en yüksek ışınım yeğinliği arasındaki fark üzerinde bir kısıt oluşturmaktadır. Bu fark, sensör kabiliyeti dışına çıktığı zaman görüntüde düşük ışıklı karanlık ya da aşırı ışıklı doygun görüntü noktaları oluşmaktadır. Güneş, lamba, ateş gibi bir ışık kaynağının ve gölge ile karanlık gibi

loş ortamlarda yer alan nesnelerin aynı görüntü içinde bulunması bu duruma örnek olarak gösterilebilir [1].

Mitsunaga ve Nayar [2], Guo ve Sonkusale [3], Tocci vd. [4] bu soruna çözüm olarak çalışmalarında özelleşmiş donanımlar önermişlerdir. Aynı zamanda bazı üreticiler geleneksel görüntüleme donanımlarından daha geniş dinamik aralığa sahip ticari ürünleri piyasaya sunmuşlardır [5]. Ancak bu ürünler hem şimdilik maliyet açısından DDA görüntüleme donanımlarının yerine geçebilecek seviyede görünmemektedir, hem de farklı değerlerde pozlamaya kıyasla daha düşük dinamik aralık sağlamaktadırlar. Bu yüzden YDA görüntü üretmek için farklı pozlama sürelerine sahip DDA görüntü dizilerini kullanmak, yaygın olarak kullanılan bir yöntem haline gelmiştir.

Bu amaçla önerilmiş olan birçok yöntem DDA görüntü dizisindeki tüm görüntülerin görüntü noktası seviyesinde örtüştüğü varsayımına dayanır [6, 7, 8, 9, 10]. Ancak gerçek hayat koşullarında sahnedeki objelerin ya da çekim donanımının hareketli olduğu durumlarda bu varsayım geçerli değildir ve oluşturulan YDA görüntüde hareket kaynaklı gölgeleme sorunu oluşur (Şekil 1).



(a)

(b)

Şekil 1: Gölgeleme problemleri: (a) Hareketli bir kamera, (b) hareket eden nesnelere.

Hareket kaynaklı gölgeleme sorununa çözüm olarak farklı çalışmalar yapılmıştır. Zimmer vd. [11] çalışmalarında görüntüleri hizalamak için enerji tabanlı bir yaklaşımla DDA görüntüler arasında optik akışı bulmak üzerine bir yöntem önermişlerdir. Farklı pozlamalardan kaynaklanan görüntüler arasındaki değişken parlaklık derecesinin etkilerinden kurtulmak için, parlaklık değişiminden nispeten az etkilenen kenar bilgisine bağlı olan yatay ve dikey görüntü türevleri kullanılmıştır. Enerji enküçültme sonucunda elde edilen yoğun yer değiştirme haritası kullanılarak yapılan hizalama sonucunda, üstünçözünürlüklü YDA görüntüler elde edilmektedir.

Hu vd. [12] ise çalışmalarında DDA görüntü dizisinden en az miktarda düşük ve aşırı ışıklı görüntü noktası içeren görüntüyü dayanak görüntüsü olarak seçip, bu görüntü ile diğer görüntüler arasında renk aktarma fonksiyonu hesaplarlar. Önerdikleri yöntem HaCohen vd. [13]'ni temel alarak görüntü noktası bazında eşleme bulmaya dayanmaktadır. Kaynak görüntüdeki düşük ve aşırı ışıklı görüntü noktaları, çevrelerinde tanımlanan bir homografi ile doğru pozlamaya sahip DDA görüntülerden Poisson harmanlama yöntemiyle düzeltilmektedir.

Sen vd. [14], DDA görüntü dizisinden en az miktarda düşük ve aşırı ışıklı görüntü noktası içeren görüntüyü dayanak görüntü olarak seçtikten sonra, iki terimli bir enerji fonksiyonunu enküçükleyecek YDA görüntü çıktısını oluşturmayı amaçlayan bir yöntem önermişlerdir. Enerji fonksiyonunun ilk terimi YDA çıktısı ile dayanak görüntü arasında görüntü noktası bazında farklılık hesaplarken, ikinci terimi YDA görüntüsü ile DDA dizisinde geri kalan görüntüler arasında Simakov vd. [15]'ni temel alan Çok-kaynaklı Çift-yönlü Benzerlik (ÇÇB) ölçütünü kullanır. Böylece oluşturulan YDA görüntü dayanak görüntü ile görüntü noktası seviyesinde benzerlik gösterir. Hesaplama verimliliği sağlamak amacıyla bu çalışmada çok ölçekli bir yaklaşım kullanılmıştır.

Hu vd. [16] Sen vd.'ne benzer olarak DDA görüntü dizisinden en iyi pozlamaya sahip görüntüyü dayanak görüntüsü olarak seçtikten sonra, dizideki her bir görüntü için dayanak görüntü olarak görünen ancak dizide seçilen görüntü gibi pozlanmış ara görüntüler oluşturur. Ara görüntüler oluşturulurken dayanak görüntü ile yoğunluk eşleme fonksiyonu hesaplanmaktadır. Dizideki diğer görüntüler, Genelleştirilmiş Yama Eşleme işlemi [17] ile ara görüntülere katkıda bulunurlar. Ara görüntüler üzerinden YDA birleştirme işlemi uygulanarak YDA görüntü elde edilir.

Son olarak, Granados vd. [18] DDA görüntü dizilerinden YDA görüntü oluşturmak için Markov Rasgele Alanları kullanan bir yaklaşım önermişlerdir. Kullanılan enerji fonksiyonu ile görüntüdeki gürültüyü, görsel devamsızlığı ve harekete bağlı gölgeleme sorununu en aza indirmeyi amaçlamışlardır.

Yazarların kendi değerlendirmeleri dışında, yukarıda bahsedilen bu yöntemlerin ortak bir veri kümesinde karşılaştırılması konu alan bir tek çalışma yapılmıştır [19]. Bu çalışma Sen vd. ve Zimmer vd.'nin yöntemleri ile Photoshop ve PhotoMatix uygulamalarında kullanılan 4 yöntemi 30 gözlemcinin öznel değerlendirmesine tabi tutmuştur. Elde edilen sonuçlar Sen vd.'nin yönteminin daha iyi sonuçlar verdiği işaret etmiştir. Bu makalede sunduğumuz çalışmayı önceki çalışmadan ayıran yönler şunlardır:

- Farklı zorluklarda ve özelliklerde DDA resim dizileri içeren geliştirilmeye açık yeni bir veri kümesi kullanılması,
- Elde edilen sonuçların farklı kriterlere göre öznel değerlendirmeye tabi tutulması,
- Nesnel bir ölçüt kullanılarak elde edilen sonuçların öznel ölçüt ile karşılaştırılması ve bu sayede nesnel ölçütün bu amaç için uygunluğunun incelenmesi,
- Önceki çalışmada en iyi olarak bulunan yöntem ile ona benzer özellikler taşıdığı düşünülen yeni bir yöntemin kıyaslanması.

Tablo 1: Deneyde kullanılan görüntü kümesinin sahne hareketi (S), kamera hareketine (K) ve hareketli obje cinsine (C) göre içerik özellikleri. +: Var, -: Yok, İ: İnsan, N: Nesne

DDA Görüntü Dizisi	S	K	C
Koridor	-	+	-
Arabalar (Elde)	+	+	N
Arabalar (Fotoğraf Sehпасı)	+	-	N
Kütüphane1 (Elde)	-	+	-
Kütüphane1 (Fotoğraf Sehпасı)	-	-	-
Kütüphane2 (Elde)	+	+	İ
Kütüphane2 (Fotoğraf Sehпасı)	+	-	İ
Ofis	-	-	-
Yayalar (Elde)	+	+	İ
Yayalar (Fotoğraf Sehпасı)	+	-	İ

2. DENEYSEL ÇERÇEVE

Deneyde kullanılan görüntü kümesi Canon EOS 550D fotoğraf makinesi üzerinde yüklü Magic Lantern 2.3 aygıt yazılımı kullanılarak çekilmiş 10 adet DDA görüntü dizisinden oluşmaktadır. Görüntü dizilerinin her biri aralarında 1 maruziyet değeri farkı bulunan 9 görüntüden oluşmaktadır. Maruziyet değeri sıfır olan görüntü (görüntüler poz süresine göre sıralandığında ortada olan görüntü) sınanmış olan her iki algoritmada da dayanak görüntüsü olarak kullanılmıştır. Deney görüntülerinin her biri 1024 × 683 büyüklüğüne boyutlandırılmıştır. Deney görüntü dizilerinden birisi tamamen durağan bir sahne içermektedir. Bu sahnenin dahil edilmesindeki amaç algoritmaların sorun içermeyen bir sahnede ek bir probleme yol açıp açmadıklarını tespit etmektir. Diğer bir görüntü dizisi sadece kamera öteleme hareketi içermektedir. Geriye kalan görüntü dizileri nesne hareketi içeren sahnelerin hem kamera eldeyen hem de fotoğraf sehпасı kullanılarak ayrı ayrı çekimiyle elde edilmiştir. Çekilen görüntülerin tümü hem JPEG hem de kamera RAW formatında kaydedilmiştir. Deneyde kullanılan görüntüler, diğer araştırmacıların algoritmalarını sınamaları amacıyla ortak erişime açılması planlanan daha geniş bir DDA görüntü kümesinin bir alt kümesidir. Çekilen resimlerin sahip olduğu özellikler Tablo 1'de verilmiştir.

Deney ortamında Sen vd. [14] ve Hu vd. [16] tarafından sağlanan MATLAB kaynak kodları kullanılmıştır. Nesnel değerlendirme ölçütü için Liu vd. [20] tarafından sağlanan MATLAB kaynak kodları kullanılmıştır. Bu çalışma bulanıklık giderme algoritmalarını nesnel olarak karşılaştırmayı amaçlamaktadır. Ancak YDA gölgeleme kusurları bulanıklık kusurlarına benzediği için aynı ölçütün bu problem için kullanılabilirliği düşünülmüştür. Liu vd. için gerekli olan bulanık görüntü girdisi yerine üzerinde hiçbir gölgeleme giderme işlemi uygulanmamış olan YDA görüntü çıktıları kullanılmıştır. Sen vd. için kamera RAW formatında işlenmemiş kamera çıktılarından elde edilen doğrusal tepki eğrisine sahip görüntüler girdi olarak kullanılmıştır. İşlenmemiş kamera çıktılarından istenen görüntüleri elde etmek için açık kaynaklı dcraw [21] yazılımı, YDA görüntülerin görsellenmesi için Bracket [22] yazılımı kullanılmıştır. Hu vd.'nin çalışmasında böyle bir gerekliliğe sahip olmadıklarını belirtmeleri nedeniyle yine RAW görüntülerden elde edilen sRGB renk uzayındaki

Tablo 2: Liu vd. [20] ölçütüne göre algoritma başarımları (sıfıra daha yakın sayı daha iyi).

DDA Görüntü Dizisi	Hu	Sen
Koridor	-9,82	-12,01
Arabalar (Elde)	-7,73	-7,88
Arabalar (Fotoğraf Sehпасı)	-8,06	-8,34
Kütüphane1 (Elde)	-10,11	-7,98
Kütüphane1 (Fotoğraf Sehпасı)	-7,45	-7,84
Kütüphane2 (Elde)	-8,68	-9,17
Kütüphane2 (Fotoğraf Sehпасı)	-9,01	-9,21
Ofis	-6,45	-7,32
Yayalar (Elde)	-10,14	-10,06
Yayalar (Fotoğraf Sehпасı)	-10,06	-9,76
Ortalama	-8,75	-8,96

görüntüler kullanılmıştır. Doğrusal tepki eğrisine sahip aşırı ışıklı ya da aşırı karanlık bazı görüntülerde Hu vd.'nin bütün görüntü karelerini aykırı değer olarak işaretleyerek başarılı bir sonuç üretmediği gözlemlenmiştir.

3. DENEYSEL ANALİZ

Elde edilen sonuçlar *görsel*, *nesnel* ve *öznel* alt başlıkları altında paylaşılmıştır.

3.1. Görsel Analiz

Şekil 2'de iki algoritmanın yer kısıtlığı sebebiyle sadece 2 sahne için ürettiği görsel sonuçlar gösterilmektedir. Seçilen bazı bölgeler kusurların daha iyi görülmesi amacıyla büyütülerek gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre Hu vd.'nin bazı görüntülerde yüksek frekanslı doku içeren bölgeleri yumuşatarak doku bilgisini kaybettiği, Sen vd.'nin ise kullandığı enerji fonksiyonunda uzamsal düzleştirme terimi bulunmadığı için özellikle karanlık ortamlarda yüksek kazanım çarpanıyla (ISO) çekilen görüntülerde gürültülü sonuçlar oluşturduğu gözlemlenmiştir. Veri kümesindeki bütün resimler için elde edilen sonuçlar yüksek çözünürlüklü olarak <http://www.ceng.metu.edu.tr/~tarhan/siu2014/siu2014.zip> adresinde paylaşılmıştır.

3.2. Nesnel Analiz

Karşılaştırılan yöntemlerin Liu vd. [20] tarafından önerilen nesnel değerlendirme ölçütüne göre elde edilen başarımları Tablo 2'de verilmiştir. Bu ölçüte göre Hu vd.'nin yönteminin daha başarılı olduğu görülmektedir.

3.3. Öznel Analiz

Nesnel değerlendirme ölçütü ile karşılaştırma yapmak amacıyla algoritma sonuçları yazarlar tarafından da öznel olarak gürültü miktarı, bozulmamışlık oranı, gölgeleme giderme başarımları kistaslarına göre değerlendirilmiş ve sonuçları Tablo 3'te paylaşılmıştır. Bu tablodaki x/y ifadesi Sen vd.'nin yönteminin x defa, Hu vd.'nin yönteminin ise y defa tercih edildiğini göstermektedir. Elde edilen sonuçlara göre Hu vd.'nin gürültü ile daha iyi başa çıkabildiği öte yandan Sen vd.'nin de nesne ve doku bütünlüğünü daha iyi koruyarak daha düşük

Tablo 3: Gürültü (G), Bozulmamışlık (B), Gölgeleme giderme kalitesi (K) kistaslarına göre öznel olarak tercih edilen algoritmalar.

DDA Görüntü Dizisi	G	B	K
Koridor	0/3	3/0	3/0
Arabalar (Elde)	0/3	3/0	2/1
Arabalar (Fotoğraf Sehпасı)	0/3	3/0	3/0
Kütüphane1 (Elde)	0/3	3/0	3/0
Kütüphane1 (Fotoğraf Sehпасı)	0/3	3/0	1/2
Kütüphane2 (Elde)	0/3	3/0	2/1
Kütüphane2 (Fotoğraf Sehпасı)	0/3	3/0	3/0
Ofis	0/3	3/0	3/0
Yayalar (Elde)	0/3	3/0	3/0
Yayalar (Fotoğraf Sehпасı)	0/3	3/0	3/0
Toplam	0/30	30/0	26/4

bozulmuşluğa sahip sonuçlar verdiği söylenebilir. Gölgeleme giderme kalitesi açısından iki algoritmanın başarımları birbirine nispeten yakın bulunmuştur ancak Hu vd.'nin gölgeleme giderme işleminden sonra bazı görüntü detaylarını da kaybetmesi Sen vd.'nin daha çok tercih edilmesine sebep olmuştur.

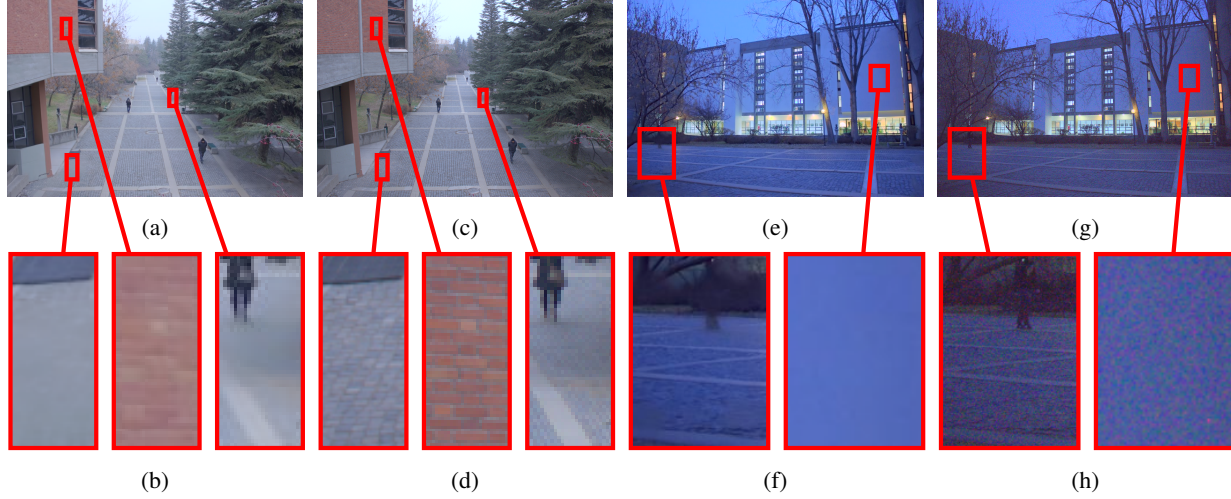
4. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar DDA görüntü dizilerinden YDA görüntü elde etmek için önerilen algoritmaların farklı başarımlarına sahip olduğunu göstermektedir. Görsel analize göre algoritmaların gölgeleme kusurlarını genel olarak ortadan kaldırdığını fakat bunu yaparken gürültü ve doku yumuşatma kusurlarına yol açtığını göstermektedir. Bu veriler öznel analiz ile desteklenmektedir. Öznel analiz ile nesnel analiz sonuçları arasında görüntülerdeki gürültü ve detay kaybı miktarına bağlı bir ilişki olduğu görülmektedir. Bu da Liu vd.'nin kullandığı nesnel değerlendirme ölçütünde görüntüdeki gürültünün nispeten yüksek bir ağırlıkla temsil edilmesine bağlanabilir.

Görüntüler üzerinde uygulanan gölgeleme giderme algoritmaları için çıktı görüntülerindeki gürültü ve yumuşatma miktarının değerlendirme üzerine önemli bir etkisi olduğu görülmüştür. Gelecekteki çalışmalarda daha geniş bir veri kümesi üzerinde Liu vd.'nin yaklaşımı temel alınarak değişik kistas ağırlıkları ile öznel değerlendirmeye yakın sonuçlar elde edilmesi ve tasarlanan değerlendirme ölçütüne göre daha yüksek başarımlara sahip gölgeleme giderme algoritmalarının önerilmesi planlanmaktadır.

5. KAYNAKÇA

- [1] Erik Reinhard, Greg Ward, Sumanta Pattanaik, and Paul Debevec, *High Dynamic Range Imaging: Acquisition, Display and Image-Based Lighting*, Morgan Kaufmann, San Francisco, second edition, 2010.
- [2] Shree K Nayar and Tomoo Mitsunaga, "High dynamic range imaging: Spatially varying pixel exposures," in *Computer Vision and Pattern Recognition, 2000. Proceedings. IEEE Conference on*. IEEE, 2000, vol. 1, pp. 472–479.
- [3] Jian Guo and Sameer Sonkusale, "A high dynamic range cmos image sensor for scientific imaging applications," *Sensors Journal, IEEE*, vol. 9, no. 10, pp. 1209–1218, 2009.



Şekil 2: Seçilen 2 sahne için karşılaştırılan yöntemlerin ürettiği sonuçlar. (a) ve (e)'de verilen Hu vd.'nin sonuçları (b) ve (f)'de bazı bölgeleri büyütülerek verilmiştir. (c) ve (g)'de Sen vd.'nin aynı görüntüler için verilen sonuçları (d) ve (h)'de bazı bölgeleri büyütülerek verilmiştir.

- [4] Michael D Tocci, Chris Kiser, Nora Tocci, and Pradeep Sen, “A versatile hdr video production system,” *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 30, no. 4, pp. 41, 2011.
- [5] Bernd Hoefflinger, Ed., *High-dynamic-range (HDR) vision: Microelectronics, image processing, computer graphics*. Springer Series in Advanced Microelectronics. Springer, Berlin, 2007.
- [6] Peter J Burt and Raymond J Kolczynski, “Enhanced image capture through fusion,” in *Computer Vision, 1993. Proceedings., Fourth International Conference on*. IEEE, 1993, pp. 173–182.
- [7] S. Mann and R. W. Picard, “On being ‘undigital’ with digital cameras: Extending dynamic range by combining differently exposed pictures,” Tech. Rep. 323, M.I.T. Media Lab Perceptual Computing Section, Boston, Massachusetts, 1994, also appears IS&T’s 48th annual conference, Cambridge, Massachusetts, May 1995.
- [8] Paul E. Debevec and Jitendra Malik, “Recovering high dynamic range radiance maps from photographs,” in *Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, New York, NY, USA, 1997, SIGGRAPH ’97, pp. 369–378, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- [9] Mark A Robertson, Sean Borman, and Robert L Stevenson, “Dynamic range improvement through multiple exposures,” in *Image Processing, 1999. ICIP 99. Proceedings. 1999 International Conference on*. IEEE, 1999, vol. 3, pp. 159–163.
- [10] Tomoo Mitsunaga and Shree K Nayar, “Radiometric self calibration,” in *Computer Vision and Pattern Recognition, 1999. IEEE Computer Society Conference on*. IEEE, 1999, vol. 1.
- [11] Henning Zimmer, Andrés Bruhn, and Joachim Weickert, “Frehand hdr imaging of moving scenes with simultaneous resolution enhancement,” *Computer Graphics Forum*, vol. 30, no. 2, pp. 405–414, 2011.
- [12] Jun Hu, Orazio Gallo, and Kari Pulli, “Exposure stacks of live scenes with hand-held cameras,” in *Computer Vision–ECCV 2012*, pp. 499–512. Springer, 2012.
- [13] Yoav HaCohen, Eli Shechtman, Dan B Goldman, and Dani Lischinski, “Non-rigid dense correspondence with applications for image enhancement,” *ACM Transactions on Graphics*, vol. 30, no. 4, pp. 70, 2011.
- [14] Pradeep Sen, Nima Khademi Kalantari, Maziar Yaesoubi, Soheil Darabi, Dan B Goldman, and Eli Shechtman, “Robust patch-based hdr reconstruction of dynamic scenes,” *ACM Trans. Graph.*, vol. 31, no. 6, pp. 203, 2012.
- [15] Denis Simakov, Yaron Caspi, Eli Shechtman, and Michal Irani, “Summarizing visual data using bidirectional similarity,” in *Computer Vision and Pattern Recognition, 2008. CVPR 2008. IEEE Conference on*. IEEE, 2008, pp. 1–8.
- [16] Jun Hu, Orazio Gallo, Kari Pulli, and Xiaobai Sun, “Hdr deghosting: How to deal with saturation?,” in *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2013 IEEE Conference on*. IEEE, 2013, pp. 1163–1170.
- [17] Connelly Barnes, Eli Shechtman, Dan B Goldman, and Adam Finkelstein, “The generalized patchmatch correspondence algorithm,” in *Computer Vision–ECCV 2010*, pp. 29–43. Springer, 2010.
- [18] Miguel Granados, Kwang In Kim, James Tompkin, and Christian Theobalt, “Automatic noise modeling for ghost-free hdr reconstruction,” *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 32, no. 6, pp. 201, 2013.
- [19] Kanita Hadziabdic, Jasminka Hasic Telalovic, and Rafal Mantiuk, “Comparison of deghosting algorithms for multi-exposure high dynamic range imaging,” in *Spring Conference on Computer Graphics*, 2013.
- [20] Yiming Liu, Jue Wang, Sunghyun Cho, Adam Finkelstein, and Szymon Rusinkiewicz, “A no-reference metric for evaluating the quality of motion deblurring,” *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 32, no. 6, pp. 175, 2013.
- [21] D. Coffin, “Dcraw: Decoding raw digital photos in linux,” <http://cybercom.net/dcoffin/dcraw>, erişim tarihi: Şubat 2014.
- [22] A.O. Akyüz, “Bracket cross-platform high-dynamic-range (hdr) photo manager,” <http://www.ceng.metu.edu.tr/~akyuz/bracket/bracket.html>, erişim tarihi: Şubat 2014.