

Yapısal Aydınlatma Kullanarak Yüzeylerin Geometrik ve Yansıtıcılık Özelliklerinin Geri Çatımı

Reconstruction of Geometrical and Reflectance Properties of Surfaces by using Structured Lighting

Şükrü Ozan, Şevket Gümüştekin
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü
{sukruozan,sevketgumustekin}@iyte.edu.tr

Özetçe —Geleneksel stereo imgeleme yöntemlerini kullanarak yüzey özneliklerinin az olduğu düz renkli ya da malzemenin doğasından kaynaklı aynasal yansıma etkisinin olduğu yüzeylerde gürbüz ve sık bir yüzey geri çatımı gerçekleştirmek mümkün olamamaktadır. Bu çalışmada önerilen yüzey tarama sistemi düz renkli ve/veya yarı parlak yüzeylerde bile gürbüz ve sık bir yüzey geri çatımı elde edilmesini sağlamaktadır. Tarama sonucunda elde edilen bilgi ile, ilgili yüzey malzemesinin yansıtıcılık özellikleri de belirli bir düzeyde geri çatılmıştır. Ayrıca çalışmada elde edilen deneysel sonuçlar gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler—yapısal aydınlatma, kamera kalibrasyonu, projeksiyon kalibrasyonu, yüzey geri çatımı, aynasal yansıma, ışınrlık, çydf.

Abstract—It is not possible to perform a robust and dense surface reconstruction for plain colored surfaces which have insufficient surface features, and for surfaces which have specularly effect because of the material nature by using traditional stereo imaging methods. The proposed surface scanner system in this work makes it possible to get a robust and dense surface reconstruction even for plain colored and/or semi glossy surfaces. Reflection properties of the surface material are also reconstructed to some extent by using the information gathered after scanning process. Moreover, the experimental results are shown.

Keywords—structured lighting, camera calibration, projector calibration, surface reconstruction, specular reflection, radiance, brdf.

I. GİRİŞ

Nesnelerin yüzeylerini geri çatmak için kullanılan farklı imgeleme yöntemleri bulunmaktadır. Bu yöntemlerin en yaygın olanı [1] çalışmasında da kullanılan, aynı sahneye ait iki imge ile gerçekleştirilen stereo imgeleme yöntemidir. Stereo imgeleme işi birbirine yakın iki konumda yanyana yerleştirilmiş iki kamera ile ya da yeri değiştirilen tek kamera ile yapılır.

İkiden fazla görüntünün kullanıldığı çalışmalar çok bakışlı imgeleme sistemleri olarak nitelendirilir. Çok bakışlı imgeleme işlemi tek kameranın farklı konumlara yerleştirilmesiyle ya

da ikiden çok kameranın farklı konumlara yerleştirilmesiyle gerçekleştirilebileceği gibi [2] çalışmasında da kullanılan, tek bir kamera ve düzlemsel aynalarla oluşturulan katadioptrik sistemlerin kullanılması ile de gerçekleştirilebilir.

Gerek stereo imgeleme sistemlerinde gerekse çok bakışlı imgeleme sistemlerinde çözülmesi gereken en temel problem karşılıklılık problemidir. Bu problemin çözümü zahmetli olmakta ve çoğu zaman da düşük başarımlarla gerçekleşmektedir. Pikselin çevresindeki piksellerle ilişkisini kullanmak üzerine kurulu bu çözüm yöntemleri, özellikle yüzey üzerinde öznelik açısından fakir bölgelerde çoğu zaman istenen sıklıkta bir geri çatımı sağlayamamaktadır.

Sahnedeki nesnelerin yüzey geometrisinin geri çatılması için kullanılagelen bir diğer yöntem ise çizgisel lazer ışık kaynakları ile kurulan sistemlerdir [3] [4]. Bu sistemler uygun yüzeylerde gürbüz ve sık bir geri çatım gerçekleştirilebilmesini sağlamaktadır ancak yüzeyin kendi yansıtıcılık özelliklerinin elde edilmesi standart imgeleme sistemlerindeki gibi doğrudan mümkün olamamaktadır.

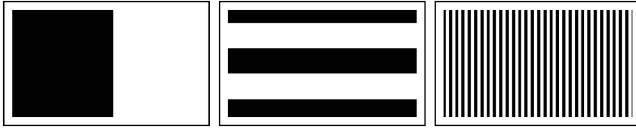
Bu çalışmada önerilen tarama sisteminde de kullanılan yapısal aydınlatma ile 3B bilginin elde edilmesi yöntemi de başarımlı oldukça yüksek bir yöntemdir. Sıralama ve renk ile kodlanmış çizgilerin bir projeksiyon aletinden yansıtılması ile tek bir imge kullanarak bile yüzey geometrisinin kısmen geri çatılması mümkün olabilmektedir [5]. Ancak ölçümleme açısından doğru bir geri çatım gerçekleştirebilmek için ikili kodlanmış çizgilerin kullanımı ve kapsamlı bir kalibrasyon tercih edilmektedir. Yapısal aydınlatma ve aydınlatma desenlerinin kodlanması ile ilgili detaylı incelemeler [6], [7] ve [8] çalışmalarında görülebilir.

Tarama sonucunda bulunan yoğun nokta bulutlarından elde edilen geometrik bilgi yüzeyden yansıyan ışınrlık değerleri ile birleştirildiğinde kısmi bir çiftyönlü yansıma dağılımı fonksiyonu (ÇYDF) ölçümü elde edilebilir. Literatürde belirli malzemeler için, küre şeklinde örnekler üzerinden alınan tam ÇYDF ölçümlerini içeren ve veri güdümlü bir ÇYDF modeli öneren [9] çalışması mevcuttur. Ancak buradaki çalışmada amaç daha iyi bir ÇYDF ölçümü yapmaktan ziyade, sahnede nesnelere elde edilen yansıma bilgilerini kullanarak malzemenin ÇYDF sini belirli bir oranda tahmin etmektir.

Elde edilen ÇYDF verisi analitik ÇYDF fonksiyonlarının parametrelerini kestirmek için kullanılmıştır. Örnek olarak seçilen ÇYDF modeli en temel modellerden birisi olan Phong yansıma modelidir [10]. Yaygın olarak kullanılan analitik yansıma modellerinin ölçülmüş ÇYDF verisine oturtulmasına ilişkin bir yöntem [11] çalışmasında anlatılmıştır. Bu çalışmada da aynı yöntem kullanılmıştır.

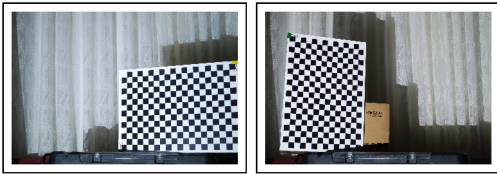
II. PROJEKSİYON VE KAMERA KALİBRASYONU

Bu çalışmada hedeflenen yaklaşım [12] ve [13] çalışmalarında da anlatılan projeksiyon aletinin bir kamera olarak modellenmesi üzerine kuruludur. Projeksiyon aletleri aslında bir görüntüleme cihazı değildir. Ancak görüntü yansıtmak için tıpkı görüntü kameralarında kullanılanlara benzer bir yongaya sahiptirler. Bu çalışmada kullandığımız projeksiyon cihazı HD çözünürlükte üç adet (kırmızı yeşil mavi, RGB) yükten bağımsız aygıt (YBA, CCD) sahiptir. Ayrıca bu cihazlar tıpkı kameraninkine benzer bir optik ön uca sahiptir. Bu durumda kamera kalibrasyonu için kullanılan tanımlar bir projeksiyonun modellenmesi için de kullanılabilir. İlgili projeksiyon piksellerini belirlemede kullanılan, sonraki bölümde anlatılacak olan gürbüz piksel sınıflandırması yöntemine yönelik olarak yansıtılan her desenin ikili tersi de yansıtılmıştır. Örnek aydınlatma desenleri Şekil 1’de görülebilir.



Şekil 1: Gray kodlama sistemi [14] ile kodlanmış satır ve sütun kodlama deseni örnekleri.

Kameranın kalibrasyon işlemi için [15] çalışmasında detayları ile anlatılan homografi yöntemi kullanılmıştır. Farklı konumlara yerleştirilen desen ile kameranın kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu konumlardan örnek iki tanesi Şekil 2’de görülebilir.



Şekil 2: Projeksiyon cihazının ve kameranın kalibrasyonu için kullanılan kalibrasyon deseninin iki değişik konumu.

Farklı konumlarda görüntülünen kalibrasyon deseni projeksiyon cihazı kullanılarak kodlanmış desenlerle de aydınlatıldığı takdirde, kamera kalibrasyonu aşamasında pikselaltı doğrulukta tespit edilen köşe noktalarının projeksiyon YBA’sı üzerindeki pikselaltı konumu da kestirilebilir. Bunun için [13] çalışmasında anlatılan yerel homografi yöntemi kullanılmıştır. Bu sayede iki cihaz için de içsel ve dışsal kalibrasyon parametreleri kestirilebilmektedir.

2B ve 3B noktaların sırasıyla $\mathbf{m} = [u, v]^T$ ve $\mathbf{M} = [X, Y, Z]^T$ şeklinde gösterildiği, bunların genişletilmiş hallerinin ise $\tilde{\mathbf{m}} = [u, v, 1]^T$ ve $\tilde{\mathbf{M}} = [X, Y, Z, 1]^T$ şeklinde

gösterildiği kabul edilsin. Bu durumda iğne deliği kamera modeli için 3B bir nokta ile imge düzlemindeki 2B karşılığı Denklem (1) ile gösterilebilir.

$$s\tilde{\mathbf{m}} = \mathbf{A}[\mathbf{R} \ \mathbf{t}]\tilde{\mathbf{M}}. \quad (1)$$

Bu denklemde s bir katsayı iken, $[\mathbf{R} \ \mathbf{t}]$ ikilisi kameranın dışsal, \mathbf{A} matrisi ise kameranın içsel parametrelerini içermektedir.

III. GÜRBÜZ PİKSEL SINIFLANDIRMASI

Kodlanmış çizgi desenlerinin kod çözümü için ardışık imgelerde aynı piksel için, bu pikseli aydınlatan ilgili projeksiyon pikselinin açık mı kapalı mı olduğunun doğru bir şekilde tespit edilmesi gerekmektedir. Bunun için [16] çalışmasında anlatılan gürbüz piksel sınıflandırması yöntemi kullanılmıştır.

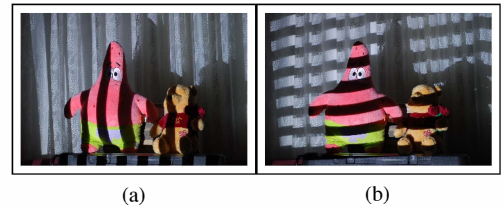
Gürbüz piksel sınıflandırması yüzey üzerinden yansıyan ışığın doğrudan (direct) ve bütünsel (global) bileşenlerinin olduğu varsayımına dayanmaktadır. [17] çalışması bu bileşenlerin projeksiyonla yansıtılacak sık aralıklı desenlerle hesaplanabileceğini göstermektedir. Bu çalışmada da sık aralıklı desenler kullanıldığı için bu bileşenler hesaplanabilmektedir. Her bir piksel için, yansıyan ışık doğrudan ve bütünsel bileşenler ile $L(p) = L_d(p) + L_b(p)$ şeklinde ifade edilebilir.

Analiz için seçilecek olan imge kümesi $\mathbf{S} = \{I_1, I_2, \dots, I_k\}$ şeklinde gösterilir ise uygun bir piksel konumundaki en büyük ve en küçük yeğlilik düzeyleri Denklem 2 ile gösterilen şekilde bulunur. En büyük ve en küçük yeğlilik değerleri (L_p^+, L_p^-) ile yansıyan ışığın doğrudan ve bütünsel bileşenleri $(L_d(p), L_b(p))$ arasındaki ilişki Denklem 3 ile gösterilebilir. Bu denklemdeki $b \in [0, 1)$ değeri kullanıcı tarafından belirlenen bir parametre olup projeksiyondaki siyah bir pikselin beyaz bir piksele oranla ne kadar ışık verdiğini gösteren bir değerdir. Bu çalışmada bu değer yaklaşık 0.3 olarak alınmıştır.

$$L_p^+ = \max_{1 \leq i \leq k} I_i(p), \quad L_p^- = \min_{1 \leq i \leq k} I_i(p), \quad (2)$$

$$L_d(p) = \frac{L_p^+ - L_p^-}{1 - b}, \quad L_b(p) = 2 \frac{L_p^- - bL_p^+}{1 - b^2}. \quad (3)$$

Şekil 3’te sütun ve satır bilgilerinin kodlandığı örnek birer aydınlatma görüntüsü görülebilir. Ardışık olarak alınan bu görüntülerde aynı piksel konumundaki yeğlilik değişimleri ile projeksiyon YBA’sı üzerindeki ilgili pikselin koordinatlarının bulunması mümkün olabilmektedir.



Şekil 3: (a) Sütun konumunun kodlandığı örnek bir aydınlatma görüntüsü (b) Satır konumunun kodlandığı örnek bir aydınlatma görüntüsü.

Gürbüz piksel sınıflandırması yöntemine ait kurallar aşağıdaki gibi yazılabilir. Burada L_d ve L_b değerlerinin yanısıra kullanıcı tarafından tanımlanan m değeri bulunmaktadır. Bu değer kabul edilebilir en küçük yeşinlik değerini göstermektedir. Bu değerden küçük yeşinlik değerleri için hesaplama yapılmamaktadır. Bunların yanısıra p değeri pikselin yeşinliğini \bar{p} değeri ise ters desen ile aydınlatılan sahne imgesinde aynı piksele karşılık gelen yeşinlik değerini göstermektedir.

Gürbüz Piksel Sınıflandırması

- | | | |
|----|--|-----------------|
| 1: | $L_d < m \rightarrow$ | Belirsiz |
| 2: | $L_d > L_b \wedge p > \bar{p} \rightarrow$ | Açık |
| 3: | $L_d > L_b \wedge p < \bar{p} \rightarrow$ | Kapalı |
| 4: | $p < L_d \wedge \bar{p} > L_b \rightarrow$ | Kapalı |
| 5: | $p > L_d \wedge \bar{p} < L_d \rightarrow$ | Açık |
| 6: | <i>diğer durumlar</i> | Belirsiz |

IV. DERİNLİK BİLGİSİNİN GERİÇATIMI

Kamera tarafından görüntülenen ve projeksiyon tarafından aydınlatılan her bir nokta için hem kamera hem de projeksiyon yongası üzerindeki piksel konumları hesaplanabildiği için herhangi bir karşılıklık problemi çözülmüne gerek kalmadan her nokta için tıpkı iki kamera ile yapılan stereo imgeleme yöntemlerinde kullanıldığı gibi derinlik bilgisi hesaplanabilmektedir. Çok bakışlı görüntüleme sistemlerinde derinlik bilgisinin nasıl hesaplandığına ilişkin detaylı anlatımlar [18] ve [19] çalışmalarında görülebilir.

V. YÜZEYİN YANSITICILIK ÖZELLİKLERİNİN GERİÇATIMI

Çiftyönlü yansıma dağılımı fonksiyonu (ÇYDF), ışığın malzeme yüzeyi ile gerçekleştirdiği etkileşimi tanımlar. Bu fonksiyon temelde, yüzeye gelen ışığın geliş yönü, gözlem yönü ve yüzey normali yönlerini kullanarak yüzeyden yansıyan ve yüzeye gelen ışınrlık (radiance) miktarlarının oranını belirtir. ÇYDF'nin en genel ifadesi Denklem 4'te görülebilir. Yüzeyden yansıyan ışığın yayınık (*diff*) ve aynasal (*spec*) bileşenleri vardır. Çalışmalarda üç renk kanalı (rgb) için ayrı ayrı hesaplanması gereken parametreler de denklemde görülmektedir.

$$M = (d_r, d_g, d_b)diff + (s_r, s_g, s_b)spec(p_0, p_1, \dots, p_n). \quad (4)$$

Yayınık yansıma bileşeni genelde Lambert yansıma modelini kabul eder ve $1/\pi$ ye eşittir. p değerleri aynasal yansımayı ifade eden olası bir fonksiyonun parametrelerini ifade eder. Bu çalışmada kullanılan Phong yansıma modeli aynasal yansıma bileşenini $f(\mathbf{p}, \omega_o, \omega_i) = (\omega_o \cdot r(\omega_i))^e$ şeklinde ifade eder. ω_o ve ω_i yansıyan ve gelen ışık yönleridir. $r(\omega_i)$ fonksiyonu gelen ışık yönüne göre aynasal yansıma yönünü ifade eden vektördür. e ise kestirilmek istenen bir katsayıdır. f tanımı bu şekilde yapıldığı takdirde tek bir renk kanalı (örneğin r) için Phong yansıma modeli Denklem 5 şeklinde gösterilebilir.

$$M_r(\mathbf{p}, \omega_o, \omega_i) = \frac{d_r}{\pi} + s_r f_r(p, \omega_o, \omega_i). \quad (5)$$

Tarama işlemi kameranın ve ışık kaynağının (projeksiyon cihazının) tam kalibrasyonunu da kapsadığından, yüzey üzerindeki her bir nokta için ışığın geliş yönü, gözlem yönü ve yüzey normali bilinmektedir. Yüzeyden yansıyan ışınrlık değerleri de bilindiği takdirde ilgili yüzeyin yansıtıcılık özelliklerini tanımlayan ÇYDF'nin bir kısmı elde edilmiş olur. Bu çalışmada ışınrlık değerlerinin elde edilebilmesi için sahnelerin yüksek dinamik erimli (YDE, HDR) olarak görüntülenmesi sağlanmıştır. Bunun için [20] çalışmasındaki yöntemler izlenmiştir.

Ölçülmüş ÇYDF verilerine analitik yansıma modelleri oturtmak mümkündür. Bu çalışmada [11] çalışmasında önerilen amaç fonksiyonu kullanılmıştır ve Denklem 6 şeklinde gösterilir. $\cos\theta_i$ gelen ışık yönünü gösteren vektörün yüzey normali ile arasındaki açının kosinüsünü ifade eder. Biz çalışmada ağırlık değerlerini (w) eşit ve 1 olarak kabul ettik. $R(\cdot)$ ölçülmüş değeri, $M(\cdot)$ analitik fonksiyonun aldığı ilgili değeri N ise eldeki örnek sayısını belirtmektedir.

$$E(\mathbf{p}) = \sqrt{\frac{\sum w [R(\omega_o, \omega_i) \cos\theta_i - M(\mathbf{p}, \omega_o, \omega_i) \cos\theta_i]^2}{\sum w}} \quad (6)$$

VI. SONUÇLAR

Bu çalışmada yüzeylerin geometrik ve fiziksel özelliklerinin geri çatılmasına yönelik bir görüntüleme sistemi ve yöntemler bütünü önerilmiştir. Görüntüleme sisteminde Epson EH-TW5200 modeli bir projeksiyon ve Nikon D60 modeli bir kamera kullanılmıştır. Çalışmada anlatılan tüm yöntemler MATLAB kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Farklı nesnelere elde edilen sonuçlar Şekil 4'te görülmektedir. Şekilde de görülebileceği üzere düz renkli alanlar bile oldukça sık şekilde geri çatılabilmektedir. Geri çatılmış yüzey üzerinde aynasal yansıma bileşenini de kapsayan bir alandan (Şekil 5) elde edilecek veriye analitik yansıma modelleri oturtulabilir. Veriye oturtulan Phong fonksiyonunun kestirilmiş parametre değerleri ile gerçekleştirilmiş sentetik görüntüler Şekil 6'da görülmektedir.



Şekil 4: Solda sahnenin gerçek görüntüsü sağda ise seçili alanda geri çatılmış nokta bulutu resmi görülmektedir.



Şekil 5: Aynasal yansımaya özellikleri gösteren örnek yüzeylerin geri çatım sonuçları. Sağdaki resimlerde görüldüğü şekilde aynasal yansımaya özelliklerinin gözlemlendiği alanlar seçildiği takdirde yüzeyin yansıtıcılık özelliklerinin belirli bir oranda geri çatımı mümkün olabilmektedir (bkz. Şekil 6).



Şekil 6: Üstteki malzeme plastik oyuncak kamyon üzerinden seçilen alandaki, alttaki malzeme ise metal çaydanlık üzerinden seçilen alandaki yansımaya verileri kullanılarak kestirilmiş Phong analitik yansımaya fonksiyonu parametreleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

KAYNAKÇA

- [1] Ozan, Ş. and Gümüştekin, Ş., “Enhancing stereo matching performance by using polarization images,” in *Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 2013 21st*. IEEE, 2013, pp. 1–4.
- [2] Ozan, Ş. and Gümüştekin, Ş., “Enhancing multiview 3d reconstruction using polarization imaging,” in *Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 2014 22nd*. IEEE, 2014, pp. 931–934.
- [3] Furukawa, R. and Kawasaki, H., “Laser range scanner based on self-calibration techniques using coplanarities and metric constraints,” *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 113, no. 11, pp. 1118–1129, 2009.
- [4] Ozan, Ş. and Gümüştekin, Ş., “Calibration of a 3d environmet scanner with a pair of line lasers,” in *Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 2012 20th*. IEEE, 2012, pp. 1–4.
- [5] Li, R. and Zha, H., “One-shot scanning using a color stripe pattern,” in *Pattern Recognition (ICPR), 2010 20th International Conference on*. IEEE, 2010, pp. 1666–1669.
- [6] Salvi, J., Pages, J., and Battle, J., “Pattern codification strategies in structured light systems,” *Pattern Recognition*, vol. 37, no. 4, pp. 827–849, 2004.
- [7] Salvi, J., Fernandez, S., Pribanic, T., and Llado, X., “A state of the art in structured light patterns for surface profilometry,” *Pattern recognition*, vol. 43, no. 8, pp. 2666–2680, 2010.
- [8] Geng, J., “Structured-light 3d surface imaging: a tutorial,” *Advances in Optics and Photonics*, vol. 3, no. 2, pp. 128–160, 2011.
- [9] Matusik, W., *A data-driven reflectance model*, Ph.D. thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2003.
- [10] Phong, B. T., “Illumination for computer generated pictures,” *Communications of the ACM*, vol. 18, no. 6, pp. 311–317, 1975.
- [11] Ngan, A., Durand, F., and Matusik, W., “Experimental analysis of brdf models,” in *Proceedings of the Sixteenth Eurographics conference on Rendering Techniques*. Eurographics Association, 2005, pp. 117–126.
- [12] Zhang, S. and Huang, P. S., “Novel method for structured light system calibration,” *Optical Engineering*, vol. 45, no. 8, pp. 083601–083601, 2006.
- [13] Moreno, D. and Taubin, G., “Simple, accurate, and robust projector-camera calibration,” in *3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization and Transmission (3DIMPVT), 2012 Second International Conference on*. IEEE, 2012, pp. 464–471.
- [14] Gray, F., “Pulse code communication,” Mar. 17 1953, US Patent 2,632,058.
- [15] Zhang, Z., “A flexible new technique for camera calibration,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 22, no. 11, pp. 1330–1334, Nov. 2000.
- [16] Xu, Y. and Aliaga, D. G., “Robust pixel classification for 3d modeling with structured light,” in *Proceedings of Graphics Interface 2007*. ACM, 2007, pp. 233–240.
- [17] Nayar, S. K., Krishnan, G., Grossberg, M. D., and Raskar, R., “Fast separation of direct and global components of a scene using high frequency illumination,” in *ACM Transactions on Graphics (TOG)*. ACM, 2006, vol. 25, pp. 935–944.
- [18] Forsyth, D. A. and Ponce, J., *Computer Vision: A Modern Approach*, Prentice Hall Professional Technical Reference, 2002.
- [19] Hartley, R. and Zisserman, A., *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Cambridge University Press, New York, NY, USA, 2 edition, 2003.
- [20] Debevec, P. E. and Malik, J., “Recovering high dynamic range radiance maps from photographs,” in *ACM SIGGRAPH 2008 classes*. ACM, 2008, p. 31.