

Çok Bakışlı 3B Geriçatımın Polarizasyon Görüntüleme Kullanımıyla İyileştirilmesi

Enhancing Multiview 3D Reconstruction Using Polarization Imaging

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

Özetçe —Sahnelere ait derinlik bilgisini elde etmede kullanılan stereo imgeleme yöntemlerinin başarımları, sahnedeki nesnelerin yansıtıcı yüzey özellikleri ve kamera ile ışık kaynağının bağıl konumundaki olası değişimler sebebiyle olumsuz yönde etkilenmektedir. Bu çalışmada, düzlemsel aynalar kullanılarak oluşturulmuş katadioptrik bir çok bakışlı imgeleme sistemi önerilmiştir. Sahnedeki aynasal yansımalarından kaynaklı stereo eşleştirme problemleri vurgulanmış ve bu problemlerin polarizasyon imgeleri kullanılarak önemli ölçüde giderilebileceği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler—polarizasyon imgeleri, stereo karşılıklılık problemi, katadioptrik çok bakışlı stereo, aynasal yansımaya.

Abstract—Performance of stereo imaging methods, which are used to find depth information of a scene, can be adversely affected by surface reflection properties of subjects in the scene and possible change in relative camera and light source positions. In this study a catadioptric multiview imaging system, which is constructed by using planar mirrors, is proposed. Stereo matching problems which are caused by the specular reflections in the scene are highlighted and it is shown that those problems can be significantly alleviated by using polarization images.

Keywords—polarization images, stereo correspondence problem, catadioptric multiview stereo, specular reflection.

I. GİRİŞ

Stereo imgeleme yöntemleri sahnedeki nesnelerin yansıtıcı yüzey özellikleri gösterdikleri durumlarda önemli başarımları kayıpları göstermektedirler. Bu durum [1] çalışmasında irdelenmiş ve yüzeyin yansıtıcılık özelliği modellenerek probleme sebep olan aynasal yansımaya bileşenlerinden kurtulmanın yolları aranmıştır. [2] çalışmasında ise problem ışık kaynaklarının farklı pozisyonda ve farklı kromatik değerlerde olduğu durumlarda ele alınmış, stereo imge çiftlerinde ters yeğnlik-renklilik uzayında yapılan analizlerle imgelerdeki ilgili ışık kaynaklarının kromatik değerleri hesaplanmıştır. Bu sayede imgeler aynasal yansımaya bileşenlerinden arındırılmış ve stereo uyumluluk probleminin başarımları büyük oranda arttırılmıştır.

[2] çalışmasının da temelini oluşturan dikromatik yansımaya modeli kullanarak ışık kaynağının kromatik değerlerinin

çıkarılmasına yönelik [3] ve [4] çalışmalarında sunulan yöntemler tek imge kullanılması açısından [5] gibi çoklu imgeler kullanan yöntemlere göre cazip olmasına karşın bazı kısıtlamaları da beraberinde getirmektedir. Bu yöntemlerde aynasal yansımaya bileşenleri elde başka bir bilgi olmadığı için basit bir yeğnlik değeri eşikleme ile bulunmaktadır. Bu yüzden, imgeleme sırasında kullanılan kameranın ayarlarının uygun şekilde yapılması ve yüksek doygunluğa sahip piksellerle karşılaşılmaması gerekmektedir. Bu durum yüksek yansıtıcılık özelliği gösteren nesnelere çoğu zaman mümkün olamamaktadır. Ayrıca kullanılan eşikleme yöntemi nesnelere üzerindeki monokromatik renge sahip alanlar ile yansımaya özelliği gösteren alanların ayrıştırılması için yeterli olmamaktadır. Bu nedenle bu çalışmada monokromatik alanların az olduğu veya hiç olmadığı nesnelere ve bu nesnelere oluşturulmuş sahneler kullanılmıştır. Bu gibi kısıtlamalar sebebiyle bu yöntemin daha genel durumlar ve sahneler için uygulanması çok mümkün olmamaktadır.

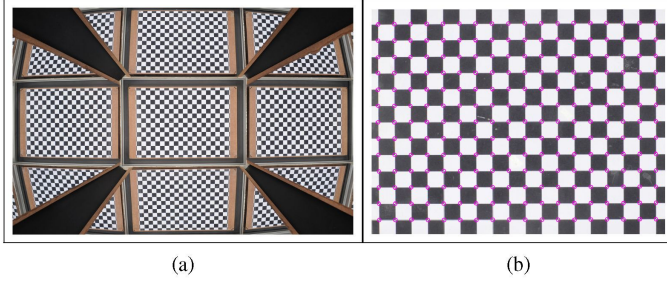
Daha önce [6] çalışmasında gerçekleştirdiğimiz yöntem ile farklı yüzey özelliklerine (renk, doku yansıtıcılık vb.) sahip nesnelere oluşturulan sahnelerde polarizasyon imgeleri kullanılarak stereo imge çiftlerinde eşleştirme başarımlarının önemli ölçüde arttırılabildiğini göstermiştik. Bu çalışmamızda ise aynı yöntemin çok bakışlı bir imgeleme sistemi ile kullanıldığında da stereo eşleştirme başarımlarının arttırıldığını gözlemlemekteyiz.

II. ÇOK BAKIŞLI STEREO İMGELEME SİSTEMİ

Bu çalışmamızda bir sahneye ilişkin çok bakışlı görüntü bilgisini tek bir çekimde verebilen bir görüntüleme sistemini kullandık. Bu sistemde [7] ve [8] çalışmalarındaki benzer bir şekilde düzlemsel aynaları kullandık. Karşılıklı olarak yerleştirilmiş dört adet düzlemsel ayna ve sabit bir kamera ile analiz edilmek istenen bir nesnenin aynı anda beş adet görüntüsünü elde etmek mümkün olmaktadır.

A. Sistemin kalibrasyonu

Sistemin kalibrasyonu için öncelikle bir damataşı deseninin görüntülenmesi öngörülmektedir (bkz. Şekil 1a). Bu sonucu kullanarak kameranın beş bakış için içsel ve dışsal parametrelerinin kalibrasyonunu gerçekleştirebiliyoruz.



Şekil 1: (a) Önerilen çok bakışlı imgeleme sistemi ile görünlüenen bir damataşı deseni (b) Bir bakış için saptanmış köşe noktaları.

1) *Piksel altı doğrulukta köşe saptama:* Damataşı deseni üzerindeki köşe noktalarının piksel altı doğrulukta saptanması kamera kalibrasyonunun doğruluğunu arttırmada önemlidir. Bu çalışmada, öncelikle damataşı desenine ait köşe piksellerini saptamak için SUSAN köşe saptama yönteminin [9] geliştirilmiş bir sürümünü kullandık. İlgili geliştirmeyi yaparken [10] ve [11] çalışmalarında önerilen tanımlamaları ve yöntemleri tercih ettik. Piksel altı doğruluğu elde etmek içinse [12] çalışmasında irdelenen dikgen vektör teorisinden faydalandık. Bu sayede damataşı deseni üzerindeki köşe noktalarının piksel altı düzeydeki konumlarını elde etmiş olduk. Şekil 1b'de bir bakış içerisindeki damataşı desenine ait saptanmış köşe noktaları görülmektedir.

2) *Kamera kalibrasyonu:* Kamera kalibrasyonu için [13] çalışmasında anlatılan algoritmayı kullandık. Burada kullanacağımız notasyon da bu çalışmadaki ilgili notasyondan alıntılanmıştır. 2B ve 3B noktaları sırasıyla $\mathbf{m} = [u, v]^T$ ve $\mathbf{M} = [X, Y, Z]^T$ şeklinde gösterdiğimizizi, bunların genişletilmiş hallerinin ise $\tilde{\mathbf{m}} = [u, v, 1]^T$ ve $\tilde{\mathbf{M}} = [X, Y, Z, 1]^T$ şeklinde gösterildiğini düşünebiliriz. İğne 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 rastgele bir değer iken $[\mathbf{R} \mathbf{t}]$ ikilisi kameranın dışsal, \mathbf{A} matrisi ise kameranın içsel parametrelerini içermektedir.

III. ÇOK BAKIŞLI 3B GERİ ÇATILMA

Çok bakışlı imgeleme sistemimizdeki her bir bakış dahilindeki 2B koordinat bilgisinden 3B uzaysal koordinatlara geçiş için bir geri çatılma işlemi gerçekleştirmekteyiz. Bunun için aşağıdaki aşamaları sırası ile uygulamaktayız.

A. İmge doğrultma

İmge doğrultma işlemi stereo eşleştirme algoritmalarının uygulanmasından önce gerçekleştirilen bir ön işlemdir. Bu çalışmada kamera kalibrasyonu aşamasında kullandığımız damataşı deseni bilgisi de elimizde olduğu için, dört en dış

köşe noktasının piksel koordinatlarını kullanarak ve bir perspektif izdüşüm işlemi gerçekleştirilerek bakışların her birini aynı düzleme oturtmamız mümkün olmaktadır.

Perspektif izdüşüm işlemi Denklem (2) ile ifade edilebilir. u_n ve v_n ($n = 1, 2, 3, 4, 5$ iken) ilgili bakıştaki imge koordinatlarını göstermektedir. Benzer şekilde \mathbf{P}_n ilgili bakışa ait perspektif projeksiyon matrisini, u_n^r ve v_n^r ise ilgili imge koordinatlarına, doğrultulmuş imge üzerinde karşılık gelen imge koordinatlarını vermektedir.

$$s[u_n^r, v_n^r, 1]^T = \mathbf{P}_n[u_n, v_n, 1]^T \quad (n = 1, 2, 3, 4, 5) \quad (2)$$

B. Stereo eşleştirme

Stereo imgelelerde birbiri ile eşleşen noktaların bulunması "stereo eşleştirme problemi" olarak adlandırılmaktadır. Bu problemin çözümüne ilişkin yöntemlerin detaylı analizleri ve karşılaştırmaları [14] çalışmasında bulunabilir. Biz bu çalışmamızda ayrıntılarına [15] çalışmasında ulaşılabilen çapraz-tilinti yöntemi ile stereo uyumluluk probleminin çözümünü gerçekleştirdik.

Kısaca özetlemek gerekirse; çapraz-tilinti yönteminde stereo imge ikililerinde seçilen küçük pencere alanları arasında düzelenmiş bir tilinti elde edilmektedir. Bu tilinti Denklem (3) şeklinde gösterilebilir. İmge ikililerinde en yüksek tilinti değerini veren pikselleri bu şekilde birbiri ile eşleştirdik.

$$COR = \frac{\sum_{i=0}^N (X_i - \bar{X}) * (Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=0}^N (X_i - \bar{X})^2 * (Y_i - \bar{Y})^2}}. \quad (3)$$

C. Yüzey geri çatımı

Bir noktaya ait 3B uzaysal koordinatlar iki ayrı bakışta birbiri ile eşleşen iki piksel koordinatından çıkartılabilmektedir. Bu ilişki doğrusal bir denklem şeklinde tanımlanabilir ve tekil değer ayrışımı problemi şeklinde ele alınıp çözülebilir.

Denklem (1) ile gösterilen ifadede beş bakış için kameraya ait içsel parametre matrisi \mathbf{A} aynı olmaktadır. Ancak sırasıyla \mathbf{R} and \mathbf{t} ile ifade edilen döndürme ve öteleme matrisleri bakışlar için farklılık göstermektedir. Bu durumda her bir bakış için ilgili projeksiyon matrisi Denklem (4) şeklinde yazılabilir.

$$\mathbf{Q}_n = \mathbf{A}[\mathbf{R}_n \mathbf{t}_n] \quad (n = 1, 2, 3, 4, 5) \quad (4)$$

Tek bir bakış için Denklem (5) şeklinde yazılabilen ifadeden Denklem (6) ve (7) ile gösterilen iki doğrusal ifade elde edilebilir. Burada \mathbf{Q}^m gösterimindeki üst simge m , \mathbf{Q} matrisinin m numaralı sütununu işaret etmektedir.

$$\begin{aligned} [u, v, 1]^T &= \mathbf{Q}[X, Y, Z, 1]^T \\ \mathbf{x} &= \mathbf{Q}\mathbf{X} \end{aligned} \quad (5)$$

$$v(\mathbf{Q}^3\mathbf{X}) - (\mathbf{Q}^2\mathbf{X}) = 0 \quad (6)$$

$$u(\mathbf{Q}^3\mathbf{X}) - (\mathbf{Q}^1\mathbf{X}) = 0 \quad (7)$$

Stereo imge ikilileri için ise Denklem (6) ve (7) ile birlikte Denklem (8) ile gösterilen şekilde matris formuna dönüştürülebilir. Bu denklemde Q_n^m gösterimindeki n altsimgesi ilgili bakışlı ifade etmektedir. Denklemdeki X , F 'nin tekil değer ayrışımı ile $F = UDV^T$ şeklinde yazılması sayesinde bulunabilir. $F^T F$ 'nin en küçük özdeğer vektörüne karşılık gelen V 'nin son sütunu bize Denklem (8)'deki X değerini vermektedir. Çok bakışlı sistemlerde yüzey geri çatımına ilişkin yöntemlere ilişkin detaylı bilgi [16] ve [17] çalışmalarında görülebilir.

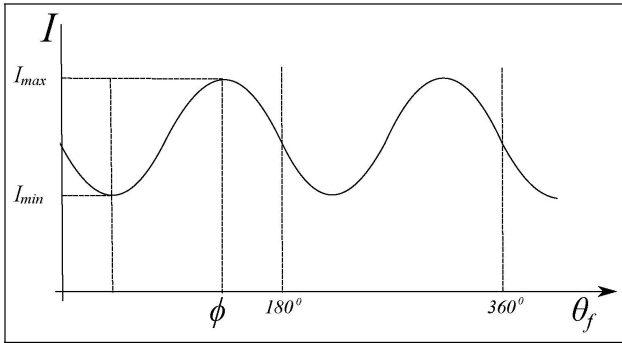
$$\begin{bmatrix} v_1 Q_1^3 & -Q_1^2 \\ u_1 Q_1^3 & -Q_1^1 \\ v_2 Q_2^3 & -Q_2^2 \\ u_2 Q_2^3 & -Q_2^1 \end{bmatrix} X = 0 \quad (8)$$

$$F X = 0$$

IV. POLARİZASYON İMGELERİ

Kamera önüne yerleştirilecek bir doğrusal polarizasyon filtresinin farklı konumları için elde edilen sonuçlar her bir piksel için ele alındığında ilgili yeğlilik değerlerinin bir kutuplanma sinüs eğrisi (Transmitted Radiance Sinusoid) oluşturduğu gözlemlenmektedir [18]. Bu değişim Denklem (9) şeklinde ifade edilebilir ve Şekil 2 ile gösterilebilir. Denklemde yer alan I_{max} ve I_{min} sırasıyla bir piksel için gözlemlenen en yüksek ve en düşük yeğlilik değerlerini göstermektedir. θ_f açısı kameranın önüne yerleştirilen kutuplanma filtresinin yönelimini gösteren açı değeridir. Denklem (9)'da görülen ϕ açı değeri ise sahnedeki nesnelere üzerindeki herhangi bir noktanın yüzey normalinin yönelimi ile ilintili olan ve değişik noktalara ait kutuplanma sinüs eğrilerinde faz farkları yaratan bir parametredir.

$$I(\theta_f, \phi) = \frac{I_{max} + I_{min}}{2} + \frac{I_{max} - I_{min}}{2} \cos(2\theta_f - 2\phi). \quad (9)$$

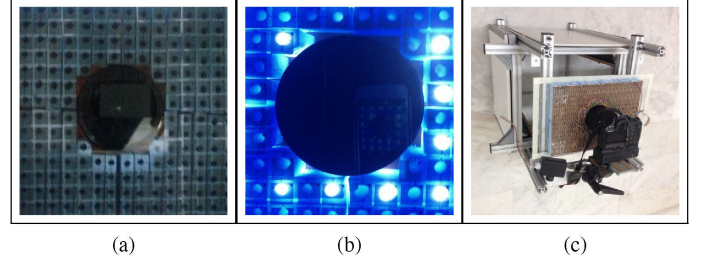


Şekil 2: Kutuplanma sinüs eğrisi.

Daha önce [6] çalışmasında elde ettiğimiz sonuca göre sahneye ilişkin, polarizasyon filtresinin dört ayrı konumu için elde edilecek ölçümler her bir piksel için TRS eğrisinin parametrelerinin kesitirimi için yeterlidir. Bu kestirim işleminin detayları ilgili çalışmada görülebilir.

Bu çalışmamızda [6] çalışmasındakinden farklı olarak, kullandığımız sistem tasarımında kameranın erişilebilir olmamasından dolayı kamera önündeki doğrusal polarizasyon

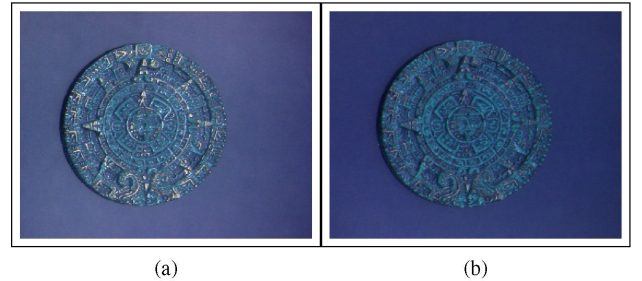
filtresinin konumunu sabit tutup ışık kaynağının yapısını polarize hale getirdik. Bunun için güçlü ledlerden oluşan bir dizilim yarattık. Daha sonra her bir ledin borsal bir kanaldan geçmesini sağlayarak ışığın mümkün olduğunca paralelleşmesini sağladık. Daha sonra bu ledlerden dörderli gruplar yaratıp bu gruplardaki her bir ledin önüne sırasıyla 0, 45, 90 ve 135 derecelerde yerleştirilmiş doğrusal kutuplanma filtreleri yerleştirdik (bkz. Şekil 3a). Bu sayede her bir çekimde ilgili led gruplarını yakarak sahnede istediğimiz polarizasyon etkisini elde ettik (bkz. Şekil 3b). Çalışmamızda kullandığımız çok bakışlı polarize aydınlatmalı görüntüleme sistemimizin tamamı Şekil 3c'de görülebilir.



Şekil 3: (a) Polarize aydınlatma için tasarladığımız led aydınlatma dizisi (b) Her bir led grubu ayrı ayrı çalıştırılarak kontrollü bir aydınlatma gerçekleştirilebilmektedir (c) Çok bakışlı polarize aydınlatmalı görüntüleme sistemi.

V. SONUÇLAR

TRS eğrisinde her bir piksel için en az yeğlilik değerine karşılık gelen I_{min} değerleri ile türetilen imgelerde yüzey yansıtıcılığının etkisi en aza indirgenebilmektedir. Çalışmamızda yansıtıcı yüzey özelliklerine sahip bir Maya Takvimi nesnesinden elde edilen sonuçları inceledik. Polarizasyon bilgisi kullanılmadan elde edilen bir bakış Şekil 4a gibi olmaktadır. İlgili görüntünün polarizasyon imgelerinden gelen bilgi ile kestirilen I_{min} değerleri ile türetilen sürümü ise Şekil 4b olmaktadır. Görüleceği üzere sahnedeki belirgin yansımaların etkisi önemli ölçüde azaltılmıştır.

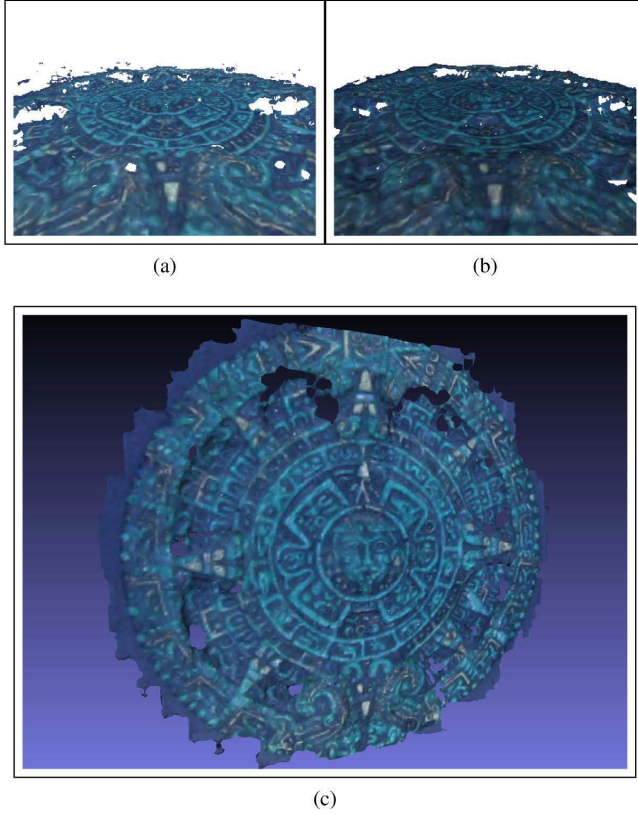


Şekil 4: (a) Yansıma etkileri giderilmemiş olan görüntüye ait bir bakış (b) Aynı bakışın polarizasyon bilgisi kullanılarak yansıma etkileri giderilmiş hali

Yüzey yansımaları engellenmeden gerçekleştirilen yüzey geri çatımı sonucu ile yansıma etkilerinden arındırılmış görüntülerle gerçekleştirilen yüzey geri çatımı sonuçlarının yakın

bakışları ise sırasıyla Şekil 5a ve 5b gibi olmaktadır. Yansımaların giderilmesi ile birlikte elde edilen 3B model orijinal nesne hakkında daha fazla sayıda ve daha az gürültülü bilgi içermektedir. Bu sebeple elde edilen sonuç diğerine göre daha iyi olmaktadır. Şekil 5c'de yansımaların giderilmesinden arındırılmış görüntülerle gerçekleştirilen yüzey geri çatımı sonucu tam olarak gösterilmektedir.

Çalışmamızda elde edilen yoğun nokta bulutlarından yüzey geri çatımını MESH LAB programı [19] içerisinde yer alan *ball-pivoting* algoritmasını [20] kullanarak gerçekleştirdik.



Şekil 5: (a) Yansımaların giderilmemiş görüntülerden elde edilen geri çatım sonucunun yakın bakışı (b) Polarizasyon bilgisi kullanılarak yansımaların giderilmiş görüntülerden elde edilen geri çatım sonucunun yakın bakışı. (Diğerine göre daha az gürültü ve daha çok bilgi içermektedir.) (c) Yansımaların giderilmiş görüntülerden geri çatılan yüzeyin tamamının önden görünüşü.

KAYNAKÇA

- [1] Dinkar N. Bhat and Shree K. Nayar, "Stereo and specular reflection," *IJCV*, vol. 26, 1998.
- [2] Ş. Ozan and Ş. Gümüştekin, "Enhancing stereo matching performance by colour normalisation and specular removal," *Electronics Letters*, vol. 47, no. 20, pp. 1124–1125, 29 2011.
- [3] R.T. Tan, K. Nishino, and K. Ikeuchi, "Illumination chromaticity estimation using inverse-intensity chromaticity space," in *Computer Vision and Pattern Recognition, 2003. Proceedings. 2003 IEEE Computer Society Conference on*, June 2003, vol. 1, pp. 1–673 – 1–680 vol.1.
- [4] Ş. Ozan and Ş. Gümüştekin, "Estimation of scene illuminant chromaticity by using single image," in *Signal Processing and Communications Applications (SIU), 2011 IEEE 19th Conference on*, April 2011, pp. 283–286.
- [5] Stephen Lin, Yuanzhen Li, Sing Bing Kang, Xin Tong, and Heung-yung Shum, "Diffuse-specular separation and depth recovery from image sequences," in *IN PROCEEDINGS OF EUROPEAN CONFERENCE ON COMPUTER VISION (ECCV), 2003*, pp. 210–224.
- [6] S. Ozan and S. Gumustekin, "Enhancing stereo matching performance by using polarization images," in *Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 2013 21st*, April 2013, pp. 1–4.
- [7] J. Gluckman and S. K. Nayar, "Catadioptric stereo using planar mirrors," *Int. J. Comput. Vision*, vol. 44, no. 1, pp. 65–79, Aug. 2001.
- [8] H. P. Wu, M. Lee, P. Weng, and S. Chen, "Epipolar geometry of catadioptric stereo systems with planar mirrors," *Image Vision Comput.*, vol. 27, no. 8, pp. 1047–1061, July 2009.
- [9] Stephen M. Smith and J. Michael Brady, "Susan: a new approach to low level image processing," *Int. J. Comput. Vision*, vol. 23, no. 1, pp. 45–78, May 1997.
- [10] D. Yin, Y. Zhao, B. Wang, Q. Song, and R. Cheng, "Improved corner detection algorithm based on SUSAN principle," in *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, Mar. 2008, vol. 6623 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*.
- [11] Y. Xingfang, H. Yumei, and L. Yan, "An improved susan corner detection algorithm based on adaptive threshold," in *Signal Processing Systems (ICSPS), 2010 2nd International Conference on*, 2010, vol. 2, pp. V2–613–V2–616.
- [12] G. Bradski, "The OpenCV Library," *Dr. Dobbs's Journal of Software Tools*, 2000.
- [13] Z. Zhang, "A flexible new technique for camera calibration," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 22, no. 11, pp. 1330–1334, Nov. 2000.
- [14] D. Scharstein and R. Szeliski, "A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms," *Int. J. Comput. Vision*, vol. 47, pp. 7–42, April 2002.
- [15] Marsha Jo Hannah, *Computer matching of areas in stereo images.*, Ph.D. thesis, Stanford, CA, USA, 1974, AAI7427032.
- [16] R. Hartley and A. Zisserman, *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Cambridge University Press, New York, NY, USA, 2 edition, 2003.
- [17] D. A. Forsyth and J. Ponce, *Computer Vision: A Modern Approach*, Prentice Hall Professional Technical Reference, 2002.
- [18] G. A. Atkinson and E. R. Hancock, "Recovery of surface orientation from diffuse polarization," *Trans. Img. Proc.*, vol. 15, no. 6, pp. 1653–1664, June 2006.
- [19] P. Cignoni, M. Corsini, and G. Ranzuglia, "Meshlab: an open-source 3d mesh processing system," *ERCIM News*, no. 73, pp. 45–46, April 2008.
- [20] F. Bernardini, J. Mittleman, H. Rushmeier, C. Silva, and G. Taubin, "The ball-pivoting algorithm for surface reconstruction," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 5, no. 4, pp. 349–359, Oct. 1999.