

Harris Köşe Bulma Algoritmasının Hacimsel Görüntüler için Uygulanması

Implementation of Harris Corner Detection Algorithm for Volumetric Images

Ceyda Nur ÖZTÜRK¹, Songül ALBAYRAK¹

¹Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
{ceyda.nur.ozturk@std, songul@ce}.yildiz.edu.tr

Özetçe—Üç boyutlu (3-B) hacimsel görüntüler için daha etkin köşe noktası tespit etmek iki boyutlu (2-B) görüntülerde çalışan Harris köşe bulma algoritmasının üçüncü boyuta genişletilmesiyle mümkün olabilir. Bu çalışmada hacimsel nesne görüntülerindeki köşe noktalarını belirlemek için 2-B kesitlerdeki köşe noktalarını bulan standart Harris algoritmasıyla bunun 3-B uyarlaması ölçek uzayında uygulanmıştır. Ölçek uzayı oluşturmada farklı yaklaşımlar kullanan 2-B ve 3-B yöntemler ile örnek nesne görüntüleri üzerinde elde edilen sonuçlar nitel olarak değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler— hacimsel görüntü; 3-B Harris köşe bulma; ölçek uzayı oluşturma; nitel değerlendirme.

Abstract—More effective detection of corner points in three dimensional (3-D) volumetric images can be possible through expansion of Harris corner detection algorithm, which run in two dimensional (2-D) images, into third dimension. In this study, the standard algorithm of Harris that detected corner points in 2-D slices and its 3-D version were implemented in the scale-space to determine the corner points of volumetric object images. The results obtained in sample object images with 2-D and 3-D methods that used different approaches for scale-space construction were qualitatively assessed.

Keywords—volumetric image; 3-D Harris corner detection; scale-space construction; qualitative analysis.

I. GİRİŞ

Standart Harris köşe bulma algoritması kendini çevreleyen komşulukta iki ana yönde yüksek eğime sahip piksel koordinatlarını araştırmak için iki boyutlu (2-B) görüntülerde çalışır. Bu piksel koordinatları genellikle köşe noktalarına tekabül eder ve benzer içerikli görüntülerde tekrarlanabilir şekilde bulunabildiğinden görüntünün ilgi noktaları olarak da adlandırılabilirler.

Harris ve Stephens [1] piksel çevresindeki yerel pencereler ve bunların farklı yönlerde kaydırılmış halleri arası ortalama yoğunluk farklılıklarına dayalı Moravec bulucunun [2] bazı eksikliklerini gidererek Harris köşe

bulma algoritmasını geliştirmiştir. Dönmelerden bağımsızlık sağlamak adına köşelilik değerlerinin hesaplanmasından önce eğimlerin bir Gauss penceresi kullanılarak konvolüsyon toplamı alınsa da Harris köşe noktalarının tamamıyla eğimlerin yönünden bağımsız olmadığı Schmid vd. [3] tarafından ifade edilmiştir. Harris köşe bulucunun ölçekten bağımsızlığı ise yöntemin bir ölçek uzayı temsiline uygulanmasıyla temin edilebilir ki bunun yaygınlıkla bilinen uyarlaması Harris-Laplace'tır [4].

Üç boyutlu (3-B) hacimsel veya uzay-zamansal bir görüntü ile çalışırken standart Harris köşe bulma algoritması görüntüdeki her bir kesit veya çerçeve için ayrıca çalıştırılmalıdır. Alternatif olarak algoritma direkt 3-B görüntüde çalışacak şekilde genişletilmelidir. İkinci yaklaşımda üçüncü boyuta ait bilginin de algoritmaya eklenmesi verinin daha geniş kapsamlı değerlendirilmesine olanak tanır. Böylece elde edilen köşe noktalarına bağlı çalışan hareket tanıma, nesne tanıma, bölütleme, çakıştırma veya yeniden inşa gibi uygulamalar hacimsel görüntülerde daha etkin sonuçlar elde edebilir [5].

Laptev ve Lindeberg [6] hem uzay hem zamandaki önemli yerel yoğunluk değişimlerini belirlemek için Harris köşe bulma algoritmasına dayalı bir uzay-zamansal ilgi noktası bulucu geliştirmiştir. Video görüntülerindeki deneysel sonuçları göstermiştir ki 3-B uzay-zamansal ilgi noktaları videoda önemli olaylara denk gelmektedir ve bu olayların ölçek bağımsız N-jet tanımlayıcıları video olaylarının özlü temsiline ve yorumlanmasında etkindir. Sipiran ve Bustos [7] hacimsel görüntüler yerine 3-B ağlar şeklinde tanımlı nesneler için Harris denklemine bağlı bir ilgi noktası bulucu geliştirmiş ve önerilen yöntemle tespit edilen ilgi noktaları için bazı dönüşümler altında yüksek tekrarlanabilirlik elde etmiştir. Bazı modern hacimsel 3-B ilgi noktası bulucularının başarımını değerlendiren Yu vd. [8] 3-B Harris yönteminin yoğunluk tabanlı ölçek uzayında nasıl uygulanacağından bahsetmiştir. Dollar vd. [9] uzay-zamansal 3-B Harris köşe noktalarının 2-B köşe noktalarına nazaran sayıca oldukça yetersiz olduğunu, bu durumun tanıma sistemleri için problem teşkil ettiğini

vurgulamıştır. Video görüntülerinde karmaşık hareket bölgelerine denk gelen ve dolayısıyla davranış tanımada önem arz eden daha çok sayıda ilgi noktası bulabilmek için uzayda Harris yöntemi zamanda ise Gabor filtreleme kullanmıştır.

Bu metinde yaygınlıkla kullanılan Harris köşe bulma algoritması direkt hacimsel görüntülerde ölçek uzayı kullanarak çalışacak şekilde genişletilmektedir (Bölüm II). Önerilen yöntemde literatürdeki uygulamalardan farklı olarak yoğunluk tabanlı bir ölçek uzayı kullanmak yerine sadece birinci dereceden türev çarpımları üzerinden oluşturulan bir ölçek uzayı kullanılmıştır. Ayrıca geleneksel karşılaştırma yaklaşımlarında olduğu gibi diğer köşe bulucularla (örn: SUSAN), yuvarlak kütle bulucularla (örn: DoH-determinant of Hessian, LoG-Laplacian of Gaussian) veya bölge bulucularla (örn: MSER-maximally stable extremal regions) karşılaştırılmasındansa, 3-B Harris köşe bulucunun kesitler üzerinde çalışan 2-B Harris köşe bulucuyla karşılaştırılması çalışmanın amacına bağlı olarak daha anlamlı bulunmuştur. Bu noktada deneyler için genişletilen yöntem ve bunun 2-B kesitlerde çalışan standart uyarlaması geliştirilmiş ve Princeton Shape Benchmark (PSB) veri tabanından [10, 11] alınmış 3-B nesne modellerinden oluşturulan hacimsel görüntülerde uygulanmıştır. Farklı şekil özelliklerine sahip nesneler için uygulanan bu 2-B ve 3-B yöntemler önerilen türev çarpımlarına bağlı veya yoğunluğa bağlı ölçek uzayında çalıştığında elde edilen sonuçlar birbirleriyle nitel olarak karşılaştırılmaktadır (Bölüm III). Son olarak yöntemlere dair elde edilen temel bulgular ve gelecek çalışmalar için bazı öneriler sunulmaktadır (Bölüm IV).

II. YÖNTEM

Hacimsel görüntüler veya videolar için Harris köşe bulma yöntemini üçüncü boyuta genişletirken Gauss ağırlıklandırılmış pencerelerdeki yerel yoğunluk farklılıklarını hesaplamak için üçüncü boyut yönündeki türevlerin etkisi de göz önünde bulundurulmuştur. Bulunan köşe sayısını arttırmak için ölçek uzayı yoğunluklar üzerinden değil de birinci dereceden türevlerin çarpımları üzerinden oluşturulmuştur. Sonra görüntü elemanlarının köşelilik değeri her bir ölçek için bu ağırlıklandırılarak toplanmış türevlere göre hesaplanmıştır. Sonuçta yerel çoklu dikdörtgenler prizması içerisinde en yüksek köşelilik değerine sahip elemanlar köşe noktaları olarak belirlenmiştir.

A. Ölçek Uzayı Temsili

Görüntünün ölçek uzayını oluşturmak bilhassa ilgi noktası bulucuların ölçekten bağımsızlığına katkı sağlamaktadır. Bu temsille bir ölçekte bulunan bir ilgi noktası daha hassas veya kaba bir görüntüde başka bir ölçekte bulunabilir. Satır, sütun ve kesitleri sırasıyla (x, y, z) eksenleriyle ifade edilen bir hacimsel görüntü I için farklı eksen çözünürlükleri düşünülebilir. Örneğin genellikle MR görüntüleri için kesitler arası uzay çözünürlüğü daha düşükken, video görüntülerinde zamanla ilişkili eksenin çözünürlüğü uzay çözünürlüklerinden

bağımsızdır [6]. Bundan dolayı bir düzgünleştirme ölçeği σ_i ile bağıntılı olarak eksenlerdeki standart sapmalar σ_x , σ_y ve σ_z duruma göre belirlenebilir. Filtre elemanlarının eksen koordinatları vektörü \mathbf{v} , (v_x, v_y, v_z)'den oluştuğunda bir 3-B Gauss filtreleme işlemi filtrenin ayrılabilirlik özelliğine dayanarak (1)'deki gibi ardışık konvolüsyon toplamalarının alınmasıyla hızlandırılabilir.

$$G^{\sigma_i}(\mathbf{v}, \Sigma) = G(v_x, \sigma_x) * G(v_y, \sigma_y) * G(v_z, \sigma_z) \quad (1)$$

İlgili hacimsel görüntünün ölçek uzayı, σ_i ile ifade edilen artan ölçek değerleri için Gauss filtresi G^{σ_i} kullanılarak görüntünün tekrarlı bir şekilde düzgünleştirilmesiyle tüm ölçeklerde örnekleme oranı değiştirilmeden oluşturulur [5]. Mesela ölçek uzayındaki her bir düzgünleştirilmiş I^{σ_i} görüntüsü I 'nın G^{σ_i} ile konvolüsyon toplamının alınmasıyla elde edilir. Böylece hassas ölçekteki detaylar giderek temizlenerek kaba ölçekteki önemli eğimlerin analizi mümkün olmaktadır. Sonuçta hacimsel görüntü için oluşturulan ölçek uzayı 4 boyutlu bir veri yapısı olup ölçek uzayındaki her bir eleman, görüntüdeki koordinatı ve ölçek ikilisi (\mathbf{c}, σ_i) ile bulunabilir.

Yoğunluğa bağlı ölçek uzayında Harris köşe bulucuyu çalıştırmak için önceki paragrafta açıklandığı üzere ilk önce görüntü yoğunlukları üzerinde tekrarlı düzgünleştirme işlemleri gerçekleştirilir. Ardından Harris köşe bulucu her bir ölçekteki 3-B görüntü I^{σ_i} üzerinde çalıştırılarak köşelilik görüntüsü C^{σ_i} elde edilir. Son olarak köşelilik görüntüleri C^{σ_i} kullanılarak 4 boyutlu yerel komşuluk W içerisinde en yüksek köşelilik değerine sahip görüntü elemanları belirlenir. Bu çalışmada önerilen yaklaşımda, Harris köşe bulucu yoğunlukları düzgünleştirerek oluşturulan bir ölçek uzayı yerine, birinci dereceden türev çarpımlarını düzgünleştirerek oluşturulan bir türev çarpımları ölçek uzayı temsili kullanmıştır. Bunun için Bölüm II.B'de açıklandığı üzere sadece birinci dereceden türev çarpımları hesaplanmış ve bunların G^{σ_i} filtreleriyle tekrarlı bir şekilde konvolüsyon toplamı alınmıştır.

B. Köşelilik Hesabı

Hacimsel görüntü I 'nın tüm görüntü elemanları için köşelilik değerini ölçmede öncelikle birinci dereceden türevler I_x , I_y ve I_z , ilgili eksen boyunca yönlendirilmiş düşük standart sapmalı bir Gauss filtresi türeviyle konvolüsyon toplamı alınarak hesaplanmıştır [3]. Ardından birinci dereceden türevlerin çiftli çarpımları (2)'deki gibi G^{σ_i} ile tekrarlı bir şekilde düzgünleştirilerek hem ilgili ölçek için öz bağıntı matrisi M^{σ_i} hem de türev çarpımları için bir ölçek uzayı temsili oluşturulmuştur. (1)'e göre hesaplanan bu düzgünleştirme işlemleriyle türev çarpım görüntülerindeki her bir eleman kendisini çevreleyen $3\sigma_i$ yarıçaplı bir elips içerisindeki komşularına ve bunlara olan mesafelere bağlı olarak ağırlıklandırılır. Böylece σ_i 'nin belirlediği yerel Gauss pencereleri kullanılarak türev çarpımlarının konvolüsyon toplamının alınmasıyla M , üç

ana yönden başka yönlerdeki görüntü eğimlerini de kısmen temsil etmekte ve görüntü düzleminin yerel geometrisini tanımlamaktadır.

$$\mathbf{M}^{\sigma_i} = \mathbf{G}^{\sigma_i} * \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y & I_x I_z \\ I_y I_x & I_y^2 & I_y I_z \\ I_z I_x & I_z I_y & I_z^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & D & E \\ D & B & F \\ E & F & C \end{bmatrix} \quad (2)$$

Görüntü elemanlarının köşelilik değerleri C^{σ_i} , öz bağıntı matrisi \mathbf{M}^{σ_i} 'nin determinanı, izi (trace) ve sabit bir katsayı olan k_H kullanılarak (3)'teki doğrusallaştırılmış formül ile belirlenir. \mathbf{M}^{σ_i} 'nin determinanı 3x3 matrislerin determinantını bulmak için tanımlanan Sarrus kuralı ile (4)'te verildiği gibi hesaplanabilir. (5)'te verilen \mathbf{M}^{σ_i} 'nin izi ise aynı matrisin köşegen değerlerinin toplanmasıyla elde edilir.

$$C^{\sigma_i} = |\mathbf{M}^{\sigma_i}| - k_H \text{tr}(\mathbf{M}^{\sigma_i})^3 \quad (3)$$

$$|\mathbf{M}^{\sigma_i}| = ABC + 2(DEF) - (BE^2) - (AF^2) - (CD^2) \quad (4)$$

$$\text{tr}(\mathbf{M}^{\sigma_i}) = A + B + C \quad (5)$$

C. Zayıf Köşeleri Baskılama

Köşelilik değeri (3)'teki formüle göre iç bölge elemanları, kenar elemanları ve köşe elemanları için bahsedilme sırasına göre artmaktadır. Dolayısıyla görüntüdeki doğru köşe noktalarını bulmak için köşelilik değerleri C^{σ_i} üzerinde bir eşik değeri t^{σ_i} uygulanmıştır ki köşelilik değeri bu eşik değerine eşit veya bundan büyük olan elemanlar muhtemel köşe noktaları olarak kabul edilmektedir. Bu eşik değeri, σ_i ölçeğindeki elemanların en düşük ve en yüksek köşelilik değerleri ile köşelilik değeri aralığını daraltma oranını belirleyen r_C katsayısına bağlı olarak (6)'ya göre dinamik bir şekilde hesaplanmıştır.

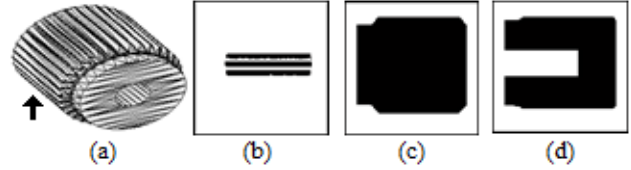
$$t^{\sigma_i} = C_{min}^{\sigma_i} + r_C |C_{max}^{\sigma_i} - C_{min}^{\sigma_i}| \quad (6)$$

Son olarak, köşelilik değeri ölçek uzayında yerel olarak en büyük olmayan noktalar sadece asıl köşe noktalarını vurgulamak için baskılanmıştır. Bu amaçla C^{σ_i} görüntüsündeki her bir elemanın, bu elemanın koordinatı \mathbf{c} 'ye merkezlenmiş bir çoklu dikdörtgenler prizması şeklindeki \mathbf{W} penceresi içerisinde diğer tüm elemanlardan en az t_d eşik değeri kadar büyük olup olmadığı kontrol edilmiştir. \mathbf{c} 'nin \mathbf{W} penceresinde bir köşe noktası olarak veya olmayarak atanması için kontrol edilen koşul (7)'de verilmektedir. Burada (\mathbf{v}, σ_w) parametre çifti \mathbf{W} penceresinin merkezi haricindeki elemanların pencere içerisindeki koordinatlarını ve ölçeğini ifade etmektedir.

$$\begin{aligned} & \mathbf{c} \text{ } \sigma_i \text{ için bir köşe, } \forall (\mathbf{v}, \sigma_w) \in \mathbf{W}, C^{\sigma_i}(\mathbf{c}) - C^{\sigma_w}(\mathbf{c} + \mathbf{v}) \geq t_d \\ & \mathbf{c} \text{ } \sigma_i \text{ için bir köşe değil, } \text{ yoksa} \end{aligned} \quad (7)$$

III. DENEYLER

Sunulan genişletilmiş 3-B Harris köşe bulma yöntemi ve bunun 2-B kesitlerde çalışan uyarlaması PSB veri tabanından [10, 11] alınan 3-B nesne modelleri üzerinde denenmiştir. Noktalar ve yüzeylerle tanımlı bir ağ şeklinde olan nesne modellerinin nokta koordinatları öncelikle 100 değeri ile ölçeklenerek hacimsel bir görüntü haline dönüştürülmüştür. Ardından 120x120x120 boyutunda bir görüntü içerisine kenarlardan eş uzaklıkta olacak şekilde oturtulmuş ve görüntü içerisindeki kapalı boş alanlar nesnelerin sadece sınırlarla tanımlı olmaması için doldurulmuştur. Şekil 1 (a)'da gösterilen bir somun nesnesi modeli için, anlatılan yolla oluşturulan hacimsel bir görüntüden sol alt köşedeki ok yönüne dik olarak alınan üç muhtelif kesit yine Şekil 1 (b)-(d)'de verilmektedir. Yöntemler farklı nesneler üzerinde de denenmesine rağmen bu metinde sadece somun nesnesi üzerinden gidilmiştir. Fakat diğer nesneler için de gözlemlenen ortak sonuçlar sunulmuştur.



Şekil 1. (a) 3-B somun modeli, (b-d) modele ait görüntüden üç kesit.

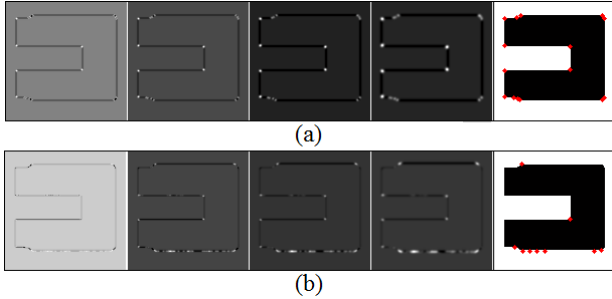
A. Kullanılan Parametreler

Nesneler üzerinde bulunan köşe noktaları kullanılan parametre değerlerine bağlı olarak değişim gösterebilmektedir. Yapılan deneylerde ölçek uzayı oluşturmak için kullanılan σ_i değerleri kümesi $\{0,5, 0,7, 1,0, 1,4\}$ olarak belirlenmiştir. Köşelilik değerini hesaplamada kullanılan k_H katsayısı 3-B Harris yöntemi için en uygun değer olduğu belirtilen 0,005 değerine [6], 2-B Harris yöntemi için ise 0,05 değerine ayarlanmıştır. Fazla sayıda köşe noktası bulunamaması halinde r_C parametresinin 0 verilmesi uygun görülmüş, daha güçlü köşe noktalarını bulabilmek içinse değeri artırılmıştır. t_d 'ye sıfıra yakın küçük bir değer verilmesi konumlandırma kesinliği düşük köşe noktalarının temizlenmesini sağlamıştır. \mathbf{W} penceresi büyüklüğü tüm ölçekler düşünülerek 2-B yöntem için [3 3 4], 3-B yöntem için de [3 3 3 4] verilmiştir.

B. 2-B ve 3-B Harris Yöntemlerinin Karşılaştırılması

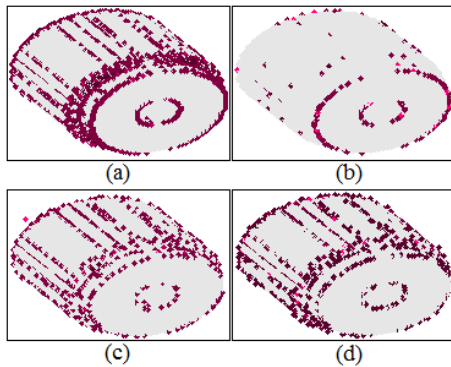
2-B Harris yöntemi Şekil 1'de örneği verildiği şekilde alınmış kesitler üzerinde ayrı ayrı çalıştırılarak nesne üzerindeki köşe noktaları elde edilmiştir. 3-B Harris yöntemi ise herhangi bir kesit alma işlemi olmaksızın direkt hacimsel görüntü üzerinde çalıştırılmıştır. Her iki yöntem için de yoğunluğa bağlı ölçek uzayı kullanmak yerine türev çarpımları ölçek uzayı kullanılmıştır. Bu yöntemlerin ölçek uzayında hesapladığı köşelilik görüntülerinin Şekil 1 (d)'de verilen kesit için gösterimi ve bu köşelilik görüntüleri ile bulunan köşe noktalarının

orijinal kesit üzerinde gösterimi Şekil 2'deki gibidir. Bu şekilde 2-B yöntemin ilgili kesit için tüm köşe noktalarını işaretlediği görülürken, 3-B yöntemin köşelilik değerleri yüksek olmasına rağmen bazı köşe noktalarını bulmadığı ve özellikle nesne kesitinin alt kısmında noktalar belirlediği gözlemlenmektedir. 3-B yöntem için gözlemlenen bu durum yöntemin ilgili nesnenin diğer kesitlerdeki geometrisine de bağlı olarak çalışmasından ileri gelmektedir.



Şekil 2. $r_c = 0$ ve $t_d = 0$ iken (a) 2-B Harris ve (b) 3-B Harris köşe bulma yöntemleri için Şekil 1 (d)'deki kesitin ölçek uzayındaki köşelilik görüntüleri (1.-4. sütun) ve aynı kesitte bulunan köşe noktaları (5. sütun).

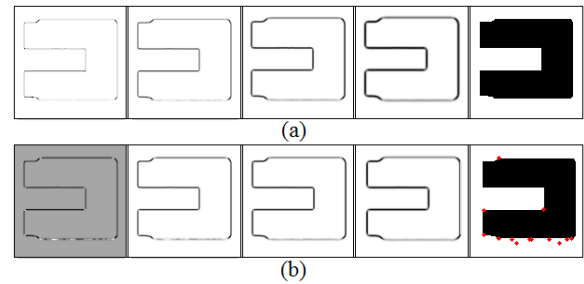
2-B ve 3-B Harris köşe bulucularla somun nesnesi yüzeyinde tespit edilmiş olan tüm noktalar Şekil 3'te sunulmaktadır. Şekil 2'deki köşe bulma sonuçlarıyla beraber düşünüldüğünde 2-B Harris'in kesitlerdeki tüm köşe noktalarını bulma eğilimi, kesitlerin alınma yönüne bağlı olarak nesne yüzeyinin bazı kısımlarında yığılmış noktalara sebep olmaktadır (Şekil 3 (a)). Bu noktada sadece en güçlü köşe noktalarının seçimi nokta yığılmalarını azaltsa da bu sefer de nesne yüzeyini tanımlamada yetersiz kalmaktadır (Şekil 3 (b)). 3-B Harris yöntemi 2-B uyarlamasının bu eksikliklerini gidermede başarılı görülmüştür (Şekil 3 (c)-(d)). Bulunan köşe noktaları nesnenin hacimsel geometrisini tanımlamaya daha elverişli olacak şekilde görece seyrek ve yeterlidir.



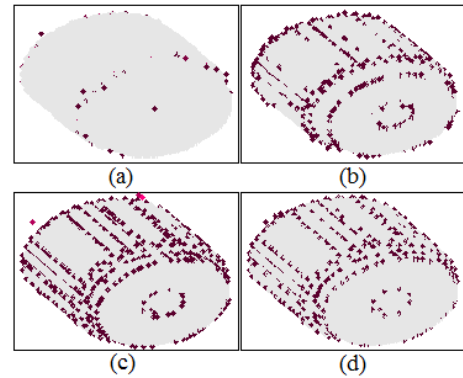
Şekil 3. (a) $r_c = 0$ ve $t_d = 0$, (b) $r_c = 1$ ve $t_d = 0,01$, (c) $r_c = 0$ ve $t_d = 0$ ve (d) $r_c = 0,5$ ve $t_d = 0,01$ iken 2-B Harris (a,b) ve 3-B Harris (c,d) yöntemleriyle somun nesnesi yüzeyinde bulunan köşe noktaları.

C. Yoğunluğa Bağlı Ölçek Uzaı ile Karşılaştırma

3-B Harris yöntemi ile yine Şekil 1 (d)'deki kesitte ve somun nesnesi yüzeyinde bulunan köşe noktaları, yoğunluklar üzerinden oluşturulan ölçek uzaı kullanıldığında sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5 (a, b)'deki gibidir. Ölçek uzaı yoğunluğa bağlı olarak oluşturulduğunda, denklem (2)'deki türevler bu ölçek uzaını kullanarak hesaplanır ve hesaplanan türevler üzerinde ikinci bir Gauss filtreleme işlemi gerçekleştirilir. Bu ikinci filtreleme işlemi için Gauss filtresinin standart sapması Yu vd.'nin [8] önerdiği gibi $0.7\sigma_1$ olarak belirlendiğinde, Dollar vd.'nin [9] bahsettiği yeterli sayıda köşe noktası bulamama problemi baş göstermiştir (Şekil 4 (a) ve Şekil 5 (a)). Aynı standart sapma değeri 0.7 'ye sabitlendiğinde ise bulunan nokta sayısında görece bir artış gözlemlenmiştir (Şekil 4 (b) ve Şekil 5 (b)).



Şekil 4. $r_c = 0$ ve $t_d = 0$ iken yoğunluğa bağlı ölçek uzaında çalışan 3-B Harris köşe bulma yöntemiyle Şekil 1 (d)'deki kesitin ölçek uzaındaki köşelilik görüntüleri ve aynı kesitte bulunan köşe noktaları.



Şekil 5. $r_c = 0$ ve $t_d = \epsilon$ iken yoğunluğa bağlı ölçek uzaında çalışan 3-B Harris (a,b) ve önerilen 3-B Harris (c,d) yöntemleriyle somun nesnesi yüzeyinde bulunan köşe noktaları.

Şekil 4'ten anlaşılabileceği üzere yoğunluğa bağlı ölçek uzaı kullanıldığında elde edilen köşelilik görüntüsü değerleri kolaylıkla sıfır altına düşebilmektedir. Bu durum köşelilik değeri yerelde en yüksek fakat nesne yüzeyinden uzakta bazı ilgisiz köşe noktalarının bulunmasına sebep olmuştur (Şekil 4 (b)). Nesne yüzeyinden kopuk görünen bu köşe noktaları t_d çok küçük bir değer olan ϵ verildiğinde temizlenmiştir (Şekil 5 (a) ve (b)). Görüntülerin ön filtrelenmesi adımını kaldırarak türev çarpımları ölçek uzaında uygulanması önerilen 3-B Harris

yöntemi için ise artan σ_i değerlerine rağmen köşelilik görüntüsü değerleri sıfır altına düşmeyip bulunan köşe noktaları sayısı aşırı derecede seyrelmemiştir. Şekil 5 (c) ve (d) sırasıyla $1.7 \sigma_i$ ve $\sigma_i + 0.7$ ölçekleri kullanıldığında somun nesnesi için elde edilen yüzey noktalarını göstermektedir.

IV. SONUÇLAR

Önerilen üçüncü boyuta genişletilmiş Harris köşe bulma yöntemi hacimsel nesne yüzeylerinin geometrisini bir bütün olarak ele alarak nesneleri tanımlamada, 2-B kesitlerde çalışan Harris köşe bulma uyarlamasına nazaran daha etkin bulunmuştur. Bu sonuca 2-B yöntemin kesitlerin alınma yönüne bağımlı çalışması ve her kesiti diğerlerinden bağımsız olarak değerlendirmesi zorunluluğu sebep olmuştur. Ayrıca yoğunluklar üzerinden oluşturulmuş ölçek uzayında çalışan 3-B Harris köşe bulucu literatürde bahsedilen yetersiz sayıda köşe noktası tespiti problemine yol açmıştır. Bu problemin önerilen türev çarpımlarına bağlı ölçek uzayı oluşturma yaklaşımıyla kısmen giderilebileceği gözlemlenmiştir. Önerilen yöntemle oluşturulan köşelilik görüntülerinin ölçek uzayı özelliğini yansıtanın yanında daha stabil olduğu anlaşılmıştır.

Noktalarının konumlandırma kesinliği ve tekrarlanabilirliği de uygulamaların amacına bağlı olarak önem kazanan ve değerlendirilmesi gereken ölçütler olarak karşımıza çıkmaktadır. Gelecek çalışmalar için, sunulan yöntemler tarafından bulunan noktaların referans bir köşe noktası kümesine nazaran konumlandırma kesinlikleri ölçülebilir. Nesnelerin yüzeyinde bulunan köşe noktalarının farklı dönüşümler altındaki tekrarlanabilirliği hesaplanabilir [8].

YAZAR KATKILARI

Birinci yazar çalışmanın sorumlu yazarı olup yöntemin araştırılması, uygulanması ve veri seti üzerinde denenmesi ile ilgili çalışmaları yapmıştır. *İkinci yazar* tüm bu çalışmalar süresince akademik danışmanlık yapmıştır.

KAYNAKÇA

- [1] Harris, C., and Stephens, M., "A Combined Corner and Edge Detector", *Alvey Vision Conference*, 15: 50, 1988.
- [2] Moravec, H. P., "Visual Mapping by a Robot Rover", *6th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 1: 598-600, 1979.
- [3] Schmid, C., Mohr, R., and Bauckhage, C., "Comparing and evaluating interest points", *IEEE 6th International Conference on Computer Vision*, 230-235, 1998.
- [4] Tuytelaars, T., and Mikolajczyk, K., "Local Invariant Feature Detectors: A Survey", *Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision*, 3(3): 177-280, 2008.
- [5] Farag, A. A., *Biomedical Image Analysis: Statistical and Variational Methods*, Chapter 9, Cambridge University Press, UK, 2014.
- [6] Laptev, I., and Lindeberg, T., "On Space-Time Interest Points", *International Journal of Computer Vision*, 64(2-3): 107-123, 2005.
- [7] Sipiran, I., and Bustos, B., "Harris 3D: A Robust Extension of the Harris Operator for Interest Point Detection on 3D Meshes", *The Visual Computer*, 27(11): 963-976, 2011.
- [8] Yu, T. H., Woodford, O. J., and Cipolla, R., "A Performance Evaluation of Volumetric 3D Interest Point Detectors", *International Journal of Computer Vision*, 102(1-3): 180-197, 2013.
- [9] Dollar, P., Rabaud, V., Cottrell, G., and Belongie, S., "Behaviour Recognition via Sparse Spatio-Temporal Features", *2nd Joint IEEE International Workshop on Visual Surveillance and Performance Evaluation of Tracking and Surveillance*, 65-72, 2005.
- [10] Shilane, P., Min, P., Kazhdan, M., and Funkhouser, T., "The Princeton Shape Benchmark", *IEEE Proceedings in Shape Modeling Applications*, 167-178, 2004.
- [11] Princeton Shape Retrieval and Analysis Group, *Princeton Shape Benchmark*, <http://shape.cs.princeton.edu/benchmark/>