

TÜRKİYE’NİN METEORİT ÇARPMA KRATERLERİ ENVANTERİ ÇALIŞMALARI

Özlem KOCAHAN¹, Ebru ŞENGÜL², Mehmet Emin ÖZEL¹

Özet

Gezegen oluşumunun son evresinde, gezegen yüzeylerinin son görünüşünün belirlenmesinde krater oluşumunun önemli rol oynadığı kabul edilmektedir [1]. Gezegen yüzeylerinde ve Dünyada uzun yıllardır sürdürülmekte olan meteorit ve çarpma kraterlerini araştırma ve inceleme çalışmaları ülkemizde çok az ele alınmıştır. Bu nedenle, ülkemizde bulunan çarpma kraterleri adayları belirlenmesine yönelik bir proje başlatılmıştır. Bu sunumda “Türkiye’nin Meteorit Çarpma Kraterleri Envanteri: Kraterlerin Morfolojik Özellikleri ve Uydu Görüntüleriyle Bulunması” projesinin şimdiye kadarki çalışmaları özetlenecektir. Ayrıca, yeryüzü görüntüleme uydularının verilerinde çarpma krateri adaylarını otomatik olarak buldurmak amacıyla geliştirilen Hough Dönüşümünü kullanan bir algoritma üzerinde de çalışmalar devam etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Meteorlar, Türkiye meteor kraterleri

Abstract

Interplanetary space is populated with large numbers of small bodies known as meteorites. Their orbits can intersect those of planets and moons. Therefore, individual impacts appear on the surfaces of planetary bodies. They are called impact craters. While impacting meteorites are useful to determine the early solar system processes, resultant impact craters are useful to determine the ages of the surfaces and related erosional effects on the body [1]. In this context, this contribution addresses: the recent activities within the TUBITAK-supported project “Meteorite Impact Crater Inventory of Turkey including (1) in-situ visits to some of the candidate structures already identified and, (2) advances in the development of an automatic recognition program for such structures in the satellite images., using a Hugh transformation. Results will be summarized.

Key words: Meteorites, impact craters in Turkey

1. Giriş

Güneş sistemimizde gezegenler ve uyduların dışında, bunlar arasında (gezegenlerarası ortamda) dolaşan ve asteroit, meteor veya göktaşı gibi isimlerle anılan irili ufaklı gök cisimleri bulunmaktadır. Bunların güneş çevresindeki yörüngeleri diğer gezegen ve cisimlerin yörüngeleriyle kesiştiklerinde, oluşan çarpışmalar sonucu gezegen ve ayların yüzeylerinde, çarpan cismin büyüklüğü, hızı, çarpma açısı ve gezegenin yüzey yapısına bağlı olarak, bir çarpma krateri oluştururlar [1].

¹ Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 17100 Çanakkale, 0 286 2180018, okocahan@comu.edu.tr, m.e.ozel@comu.edu.tr

² Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 17100, Çanakkale, 0 286 21800 8, ebrusengul@comu.edu.tr

Çarpma kraterleri, güneş sistemindeki neredeyse bütün gezegen, uydu ve diğer asteroidlerin yüzeyini etkileyen önemli bir oluşumdur [2]. Dünya yüzeyinde, oldukça büyük meteoritlerin çarpmaları sonucu oluştuğu bilinen, yaklaşık 130 kadar, morfolojileri ve büyüklükleri farklı büyük boy çarpma krateri bulunmaktadır [3].

Dünyada uzunca bir süredir sürdürülmekte olan meteorit ve çarpma krateri araştırma ve incelemeleri ülkemizde çok az ele alınmıştır. Ülkemiz gibi geniş alanların bu türden araştırmalarında, son yıllarda uzaktan algılama uydularının görüntüleri yeni ufuklar açmış ve bu tür yapıların belirlenmesini oldukça kolaylaştırmıştır [4]. Bu nedenle, bu çalışmada, uzaktan algılama teknikleriyle uydu görüntüleri analiz edilerek, tüm Türkiye’de bulunan çarpma krateri adayları belirlenmekte ve yerinde incelemelerle denetlenmektedir. Bu dönemde, bazı yeni krater adayları yanında, daha önceki çalışmalarda [4, 5, 6] yerleri belirlenmiş aday kraterlerden bazıları da daha yakından incelemeye alınmıştır.

Bu doğrultuda, ilk elde

(A) Türkiye uydu görüntülerinde görsel yöntemlerle belirlenebilen adayların yerinde incelenmesi,

(B) Varolan tarihsel ve diğer kayıtlar ışığında belirlenen bazı meteor ve krater adaylarının incelenmesi planlanmıştır. Bu ikinci grup adaylara arasında şunlar bulunmaktadır:

i – 26 Haziran 2001 tarihinde basına ve kayıtlara geçen Antalya’daki meteorit olayı, Ağustos 2004 tarihli Manisa’da ve Edremit’te görülen meteorit olayları ve Temmuz 2004 tarihinde İzmir–Alaçatı’da olan olaydaki gibi, meteorit olması ihtimali olan, ama iyi tanımlanamamış bazı taşıl yapıların analizleri ve tarihlendirmesi ile ilgili bulguların derlenmesi [7],

ii - Tarihsel kaynaklarda geçen (a) Çanakkale – Gelibolu (b) Efes – Artemis Mabedi (c) İzmir – Birgi meteoridi başta olmak üzere, ülkemizdeki meteorit/çarpma krateri olayları ile ilgili bilgilerin derlenmesi ve olası yerlerinin belirlenmesi [8],

iii - Diğer tarihsel ve yerel kaynaklardan elde edilecek bilgilerin derlenmesi ve takibi. Ayrıca,

(C) Yakın tarihte veya bu çalışma sırasında ortaya çıkacak meteorit/çarpma krateri adayları ve olayları ile ilgili bilgilerin derlenmesi, olası yerlerinin belirlenmesi, incelenmesi ve kataloglanması,

(D) Kraterlerin ve buldukları bölgelerin morfolojik-jeolojik yapılarının incelenmesi, bu bölgeler ait uydu görüntülerinin işlenmesi ve diğer veriler de göz önünde bulundurularak çarpma kraterlerinin özelliklerinin belirlenmesi, yerinde inceleme yapılması,

(E) Çalışmalarına başlanan bir ‘otomatik krater belirleme’ bilgisayar programı hazırlıklarının geliştirilmesi (ve, giderek, elde edilecek adayların incelenmesi),

(F) Derlenen bütün veriler kullanılarak oluşturulacak envanterin bilgisayar ortamında bir veri tabanının oluşturulması, hedeflenmiştir.

2. Çarpma Krateri Adayları ve İnceleme Çalışmaları

Aşağıda listesi verilen çarpma krateri adaylarından X ile işaretlenenler ile ilgili ilk arazi inceleme çalışmaları 16–17 Haziran 2005 ve 15 – 20 Ağustos 2005 tarihleri arasında gerçekleştirilmiştir.

Bu liste, Dağcı (1997) ve Özel ve ark. (1998) tarafından yapılan çalışmalarda Türkiye’de bulunması muhtemel kraterler yine uzaktan algılama yöntemleriyle oluşturulmuş, bu yöndeki ilk bulgular o zaman yürütülen TÜBİTAK Tez Destek projesi yöneticisi ve danışmanlarının da katıldığı bazı yazılarda özetlenmiştir [4-8]. 1, 2, 3, 5, 6 ve 9 numaralı adaylar için arazi çalışmaları Dağcı ve Özel (1997) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu listede yer alan Darende (Malatya) aday çarpma krateri ile yine harita çalışmalarında ve basın

haberlerinde belirlenen Doğubayazıt (Ağrı) aday çarpma kraterinin incelenmesi, 15 – 20 Ağustos 2005 tarihlerinde proje gezisi sırasında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, Develi Belediyesi (Kayseri) ile işbirliği halinde 16–17 Haziran tarihlerinde, Develi İlçesinin 40 km kadar doğusunda, Kale Köyü sınırları içinde yer alan ve Evren Çukuru olarak bilinen yapı için de ayrı bir arazi çalışması yapılmıştır.

Tablo 1. Aday çarpma kraterleri listesi

	Aday yapının adı	Yeri	Çapı	
1	Yunak1-Yeşilyayla	Konya-Yunak	450 m	
2	Yunak2-Akpınar	Konya-Yunak	~660 m	
3	Yunak3	Konya-Yunak	~2 km	
4	Kartal Çukuru	Malatya-Darende	270 m	X
5	Apa-Tahtalı	Konya-Meram	270 m	
6	Eber	Afyon-Bolvadin	180 m	
7	Karkışla	Antalya	~3,5 km	
8	Çaltepe	Antalya	~20 km	
9	Meyil-Çıralı	Konya-Karapınar	çoklu yapı	
10	Doğubayazıt-Meteor Çukuru	Ağrı-Doğubayazıt	~30 m	X
11	Kaleköy-Evren Çukuru	Kayseri-Develi	~ 80 m	X
12	Konya Ovası Krateri	Konya	~ 40 km	

I. Kartal Çukuru İncelemesi (Malatya)

Darende ilçesinin 40 km kuzey-doğusunda, Akbaba köyü yakınlarında bulunan “Kartal Çukuru” adlı yapı üzerinde, proje ekibimize ek olarak, İnönü Üniversitesinden jeolog Yrd. Doç.Dr. Ayten ÖNAL ve Darende Tapu ve Kadastro Müdürlüğü’nden harita mühendisi Caner KAYALI’dan oluşan ekibimiz yerinde incelemelerde bulunmuştur. 19.08.2005 tarihinde gerçekleştirilen bu çalışmada, yapının çevresinde farklı noktalarda, ilçe Tapu ve Kadastro Müdürlüğü’nden temin edilen GPS aleti ile koordinat ölçümleri yapılmış ve çevreden ve Kartal Çukuru’nun içinden çeşitli kayaç örnekleri toplanmıştır.

Yerinde yapılan ölçümlerde, çukur çapı $2R = 270 \pm 5$ metre ve derinliği $h = 30 \pm 2$ metre olarak ölçülmüştür. MTA’nın 2002 yılı 1/500.000 ölçekli jeoloji haritasında, Akbaba - Çalıdağ bölgesinin Jura-Tebeşir (Kretase - Cretase) dönemine uzanan yaşlı Neritik (sığ denizel) kireçtaşından oluştuğu belirtilmektedir. Çukurun iç kenarlarında yüzeylenen kireçtaşının oldukça kırıklı olduğu görülmektedir ve gözlemlenebilen kırıkların dışında mikro-kırıkların da bulunma olasılığı vardır. Bu çukurun ne zaman oluştuğu konusu henüz yanıtlanamamıştır. Çalışmanın ileri aşamalarında kullanılmak üzere örnekler alınmış, bölgenin fotoğrafları çekilmiş ve kısa bir video çekimi yapılmıştır.

II. Doğubayazıt Meteor Çukuru İncelemesi (Ağrı)

Turistik ve diğer haritalarda da adı geçen Ağrı-Doğubayazıt “Meteor Çukuru”, Doğubayazıt kentinin yaklaşık 30 km güney-doğusunda ve Türkiye-İran arasındaki Gürbulak Sınır Kapısı yakınlarında yer almaktadır. Çalışma ekibimizin yerel görevliler ve bir jeoloji mühendisi ile birlikte bölgeye yaptığı ön inceleme gezisinde öncelikle Meteor Çukuru’nun çeşitli noktalarında ilçe Tapu ve Kadastro Müdürlüğü’nden temin edilen GPS aleti ile koordinat ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Çevreden el örnekleri toplanmış, video ve fotoğraf çekimi yapılmıştır. Ayrıca Meteor Çukuru yakınlarında bulunan jandarma karakolu personelinden çevreyle ilgili ek bilgiler alınmıştır. 1/500.000 ölçekli MTA jeoloji haritalarına bakıldığında bölgenin jeolojik olarak volkaniklerden oluştuğu görülmektedir. Ayrıca gözlemler Meteor Çukurunun bazaltik bir yapının içinde oluştuğu göstermektedir.

Meteor Çukuru yanında kaynağı belirtilmeyen yazılı bulunan bilgilendirme tabelasında: “1892 yılının Eylül ayında bir göktaşı Türkiye'nin doğusundaki Gürbulak Sınır Kapısı'nın 2 km kuzeyinde bulunan Bozalt yaylasına [buraya] düşmüştür. Göktaşı büyük bir kor halinde kilometrelerce uzaktan duyulan bir ses çıkartarak kayaları yarmıştır. İşte bu göktaşının oluşturduğu silindir şeklindeki çukurun çapı 35 metre, derinliği 60 metredir. ...Ne yazık ki geçen zaman içinde çukur çamur ve toprakla dolmuştur... Çarpan meteor toprak yığınının altındadır” bilgisi verilmektedir. Gerçekten de geçen zaman içinde rüzgâr, yağmur gibi doğal nedenlerle güncel toprak örtüsünün çukuru doldurduğu görülmektedir. Çukurun derinliğinin şu anda 30 metre civarında olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, çukurun bulunduğu bölge, daha yüksekçe (30m) fakat kratere uzak (200m) bir tepe yamacından incelenmiş ve çukurun etrafında simetrik olarak iki sıra yay oluşturduğu intibasını veren yükselti/tepecikler tespit edilmiştir. Ancak, bu tepeciklerin aday yapıyla ilişkileri olup olmadığı henüz belirsizdir. Yöre halkıyla bu konuda yapılan görüşmelerde ise “meteorun çukurun dibinde yatmakta” olduğu “iddiası” vardır. Ancak, bu bilgiler ve tabeladaki tarihlendirmeleri kanıtlamak ve bunlar arasında tutarlılık sağlamak şimdilik olanaksız görünmektedir. Bu olayın belirtilen tarihlerde İstanbul basınında yer alıp almadığının incelenmesi yararlı olabilir. Bu konuda gerekli eski yazı uzmanlığı ve 1890 yıllarına ait gazete koleksiyonlarının temini gibi kolay görünmeyen engeller söz konusudur. Bu yöndeki çalışmalara önümüzdeki dönemde sürdürülecektir.

Yapılan diğer bir incelemede, elde edilen bulguların literatür ile uyumluluğu araştırılmış ve Doğubayazıt Meteor Çukuru hakkındaki bir teknik yayına göre[9]; çukurun silindir şekli, çevresinde hiçbir kabarma meydana gelmemiş olması, çökmeyi gösteren yatay çatlakların bulunması, çukurun tabanının duvarların altına doğru girinti yapması, sıkıştırma sonucu gelişmiş hiçbir yapı bulundurmuyışı, çukurun meteor çarpma çukuru olmayıp çökme çukuru olduğu sonucuna varılmıştır. Aynı çalışmada, Doğubayazıt meteor çukuru adayının blok bazalt lavı içinde geliştiği ve dolayısıyla lav tünelinin çökmesiyle oluştuğu görüşü ağırlık kazanmıştır. Bu çalışmanın gerçekleştirildiği dönemden bu zamana kadar çukurun önemli bir kısmı dolmuş olmasına rağmen, bahsedilen belirtilerin hepsi yapılan arazi incelememizde tarafımızdan da gözlemlenmiştir. Bulgularımız Arpat ve Güner'in yorumlarına destek vermekte, bu çukurun bir çökme sonucu oluşmuş olması olasılığını güçlendirmektedir.

III. Develi - Evren Çukuru İncelemesi (Kayseri)

1/25.000'lik Türkiye topografik haritalarında “Evren Çukuru” olarak bilinen yapı da Develi Belediyesi tarafından grubumuza iletilmiş ve (program dışı olarak) 16-17 Haziran 2005 tarihinde yapılan bir gezide incelenmiştir. Çukurun en üst dış çapı 80 m; derinliği 60 m, çevresi 250 m, kapladığı üst yüzey alanı ~ 5.000 m² ve düzgün kesik-koni yapısındaki hacmi 300.000 m³'dür. Bu ilk veriler ve Evren Çukuru'nun fotoğrafları dikkate alındığında, yapının aday bir meteor krateri olarak incelemesi uygun bulunmuştur. Bu yöndeki çalışmalara yöreye ait 2000 yılı LANDSAT- ETM görüntüleri (15-30 m çözünürlümlü) ve diğer incelenmelerle devam edilmektedir. İlk değerlendirmeler bölgenin genel jeolojik yapısı ve krater adayının morfolojisinin incelenmesine ilişkindir. Çalışmanın ileriki aşamalarında kullanılmak üzere bölgede video ve fotoğraf çekimleri yapılmış ve çevreden ve çukurun içinden çeşitli el örnekleri toplanmıştır.

2006 yılı içinde, Belediye'nin de katkıları ile, çukurun tabanından derine bir kesit alımı ve elde edilecek kesitin incelenmesi planlanmaktadır.

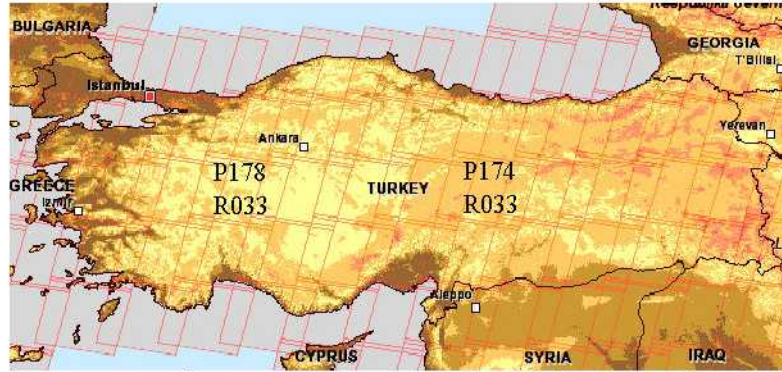
3. Uzaktan Algılama Çalışmaları

Özellikle Türkiye gibi büyük ülkelerde, yeryüzünde aranacak geniş ölçekli yapıların tespiti ve incelenmesinde yüzeyin yukarıdan uçak ya da uydularla uzaktan algılama amaçlı çok renkli ve sayısal görüntüleri büyük kolaylıklar sağlamaktadır.

3.1 Türkiye Görüntü Arşivi

Bu çalışma için, uzaktan algılama çalışmalarına başlamadan önce, bir "Türkiye Uydu Görüntüleri - TUG Arşivi" oluşturulmuştur. Türkiye, Landsat ETM+ uydusunun geçiş yörüngesine göre eşit genişlikte 3 yatay kuşağa ayrılmıştır (Güney / Akdeniz; Orta / Anadolu; Kuzey / Karadeniz) (Şekil 1). Bu kuşaklar üzerinde bulunan, Landsat ETM+ uydusunun geçiş yörüngesinin sıra ve sütun numaralarına göre 182–169 arası sütunları ve 41–35 arası sıralar ülkemizi tümüyle kaplamaktadır. Genellikle 2000–2001 yıllarına ait (bütün Türkiye'yi kapsayan) 54 adet Landsat ETM+ görüntüleri internet üzerinden indirilmiş ve 8 DVD'de arşivlenmiştir. (Ayrıca, aday çarpma kraterlerinin buldukları bölgeler için, şu anda devam etmekte olan TÜBİTAK projesiyle daha yüksek çözünürlüklü görüntüler alınması planlanmıştır.)

Son bir gelişme, internet ortamında genel kullanıma açılan Google Earth ve Earth Globe gibi yeni sitelerdir. Nitekim bu sitelerin sağladığı görüntüleme ve görüntüler üzerinde dolanım olanaklarının denenmesi sırasında Orta Anadolu'da yeni bir krater adayı belirlenmiş ve incelenecek adaylar listemize eklenmiştir.



Şekil 1. Landsat ETM+ uydusunun Türkiye üzerinde aldığı görüntü karelerinin komumu ve sınırları (Şekil üzerinde örnek olarak iki görüntünün satır ve sütun numaraları verilmiştir.)

3.2 Görüntü İşleme Çalışmaları

Uzaktan algılama ile krater bulma çalışmalarında pek çok farklı yöntemle görüntü işleme yapmak mümkündür. Uydu verilerinde krater adaylarını otomatik olarak buldurmak amacıyla farklı algoritmalar geliştirilmiş ve kullanılmıştır. Bir çok çalışmada [10-15] görüntülerdeki dairesel ve benzeri yapıları otomatik olarak buldurmak için matematiksel Hough Dönüşümü (HD) kullanılmaktadır. Ancak bu dönüşümü özellikle büyük boyutlu ve çok sayıdaki görüntülerde kullanmak için bazı ek görüntü işleme teknikleri kullanmak gerekmektedir [16].

3.3 Görüntülerde Otomatik Krater Bulma Çalışmaları

Çalışmanın bu bölümünde, krater benzeri yapıları uydu verilerinden otomatik buldurmak amacıyla MATLAB yazılımı aracılığı ile bazı örnek görüntüler üzerinde Hough Dönüşüm – HD tekniği denenmiştir. Çok belirgin yapıların bulunmasına karşılık, hala algoritma üzerinde bazı optimizasyonlar gerekmektedir. (Bu konudaki çalışmalar ile ilgili ayrıntılar Ek-1'de verilmiştir).

4. Sonuç

Projenin sonuç hedefi olan ‘İnternet ortamında sayısal Türkiye Çarpma Krateri Envanteri’ için gerekli hazırlıklar devam etmektedir. 2006 yaz aylarında yapılacak incelemelerle bu listedeki adayların büyük çoğunluğu incelenmiş olacaktır. Otomatik krater adayları belirlenmesi programının sonuçları ile elde edilecek adayların da incelenmesi ve değerlendirilmesi ile laboratuvar çalışmaları tamamlanacaktır.

Kaynaklar

- [1] Melosh, H.J. and Ivanov, B.A., (1999), “Impact Crater Collapse”, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 27:385-415.
- [2] Melosh, H.J., Beyer, R.A., (2004), “Earth Impact Effects Program”, <http://www.lpl.arizona.edu/impaceteffects/>
- [3] McSween, H.Y., (1999), “*Meteorites and Their Parent Planets*” Second Edition, Cambridge University Pres, UK.
- [4] Dağcı, M., (1997), “*Türkiye’de Meteorit Kraterlerinin Landsat Uydu Görüntülerinde Aranması*”, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.
- [5] Özel, M.E., 1997, “Türkiye’de Meteorit Krateri Var mı? (1)”, *Cumhuriyet Bilim Teknik*, 530, 9.
- [6] Özel, M.E. ve ark., (1998), “Türkiye’de Meteorit Krateri Var mı? (2)”, *Cumhuriyet Bilim Teknik*, 584, 12.
- [7] Özel, M.E., 2004, Özel Görüşme.
- [8] Budding, E. ve ark., (2003), “Ancients Craters of Anatolia”, *Archaeo – Physics Symposium*, ÇOMÜ, Çanakkale.
- [9] Arpat E. ve Güner Y., (1976), “Göktaş Çukuru mu? Çökme Çukuru mu?”, *Yeryuvarı ve İnsan*, I-1, 12
- [10] Marchetti, P.G., (2002), “*Automatic Recognition of Crater Like Structures*”, European Space Agency Contract Report, Rome.
- [11] Bruzzone, L., Lizzi, L., Marchetti, P.G., Earl, J., Milnes, M., 2004, (2004), “Recognition and Detection of Impact Craters From Eo Products”, *Proc. of the ESA-EUSC Conference on Theory and Applications of Knowledge driven Image Information Mining, with focus on Earth Observation*, Noordwijk, The Netherlands:European Space Agency (ESA). Vol. 553, http://earth.esa.int/rtd/Events/ESA-EUSC_2004/.
- [12] Sawabe, Y., Matsunaga, T., Rokugawa, S., (2005), “Automated detection and classification of lunar craters using multiple approaches”, *Advances in Space Research*, in pres.
- [13] Lladós, J., (2003), “*The Hough Transform as a Tool for Image Analysis*” Computer Vision Center - Dept. Informàtica. Universitat Autònoma de Barcelona, Computer Vision Master.
- [14] Burghardt, T., (2003), “Circle Detection in Images Using classic Sobel Filter and Hough Transformation”, *Master of Science Course in Global Computing and Multimedia*, University of Bristol.
- [15] Chen, T.C. ve Chung, K.L., (2001), “An Efficient Randomized Algorithm for Detecting Circles”, *Computer Vision and Image Understanding* 83, 172–191.
- [16] Gonzales, R.C., Woods, R.E., Eddins, S.L., (2004), “*Digital Image Processing using MATLAB*”, Marcia Horton, USA, Published by Prentice Hall.

EK-1

Görüntü üzerinde yaylar, yay parçaları ve dairesel yapılar bulma amaçlı olarak Dairesel Hough Dönüşümü(Circle Hough Transform , CHT)'nin tanımı ve kullanılması

Hough Dönüşümü, fotoğraflardaki çizgileri tanımlamak için 1962 yılında Paul Hough tarafından geliştirilmiştir. Bu yaklaşımda, her çizgi kendi parametreleriyle tanımlanır ve çizgileri arama 'parametre uzayı' denen matematiksel yapı içinde gerçekleştirilir [11]. Duda ve Hart, ilk kez 1972 yılında fotoğrafta çember yapıları bulmak için HD kullanmışlardır. Çembere ait (x,y) noktaları, çemberin merkez koordinatları (a;b) ve yarıçapı r ise, (1) denklemini sağlarlar [13]:

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2 \quad (1)$$

Bu durumda çemberin kutupsal koordinatları (r, θ) düzlemindeki parametrik gösterimi (2) denklemi ile verilir.

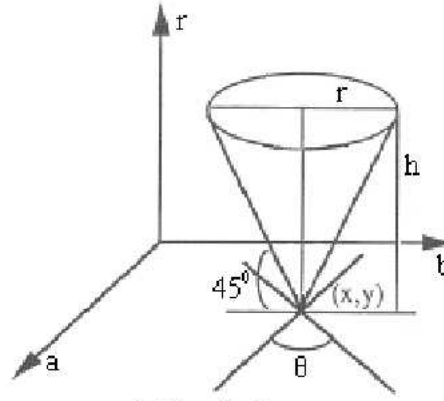
$$\Gamma(x, y) : \begin{cases} x = a + r \cos \theta \\ y = b + r \sin \theta \end{cases} \quad \theta \in (0, 2\pi] \quad (2)$$

Böylece bir görüntüdeki çembersel yapı, verilen a, b ve r parametreleriyle tümüyle tanımlanabilir. (a,b,r) parametrelerine karşılık gelen bir nokta, 3 boyutlu parametre uzayında tanımlanmış olur. HD' de, her (x,y) noktası, aşağıdaki (denklem 3) gösterime uygun olarak, bir koni yüzeyinde bulunacaktır [13].

$$H(a, b, r) : \begin{cases} a = x - r \cos \theta \\ b = y - r \sin \theta \end{cases} \quad \theta \in (0, 2\pi] \quad (3)$$

Görüntüde, bu dönüşümle bir çemberi tanımlayabilmek için, denklem 3'e göre merkezin koordinatlarını (C(a,b)) ve yarıçapını r bulmamız gerekir. Eğer r'nin alabileceği değerleri belirli aralıklarda tanımlarsak (örneğin 5 piksel- 30 piksel aralığı gibi), bulunması gereken sadece merkezin (a, b) koordinatları kalır. Ancak HD' de her resim elemanı bir koni gibi tanımlanabileceği için, bu koninin yüksekliği h ve yatayla yaptığı açı α değişken olarak karşımıza çıkar. Bu durumda eğer baştan koninin yatayla yaptığı açının $\alpha = 45^\circ$ olduğunu kabul edersek, çemberin yarıçapı ile koninin yüksekliği eşit olur. Dolayısıyla elimizde yine (a, b, r) değişkenleri kalır (Şekil A-1).

HD ile birçok değişkenle ve çok boyutta eğri bulmada hesaplama, bilgisayarın kapasitesine göre değişmekle birlikte, karışık ve zaman alıcı bir iştir. Çember bulma işlemindeki (a, b, r) değişkenleri, üç boyutlu parametre uzayını tanımlarlar ve değişme aralıkları görüntü ve piksel boyutlarına bağlıdır. Dolayısıyla pratik bir çözüme ulaşmak ve algoritmayı hızlandırmak amacıyla ek işlemler uygulamak gerekmektedir. Uydu görüntüleri üzerinde komşuluk-farkı-eğimi (gradyan) uygulanırsa problemimiz iki boyuta indirgenmiş olur. Teorik çalışmalar görüntü üzerinde gradyan uygulamanın bu problemi iki boyuta düşürdüğünü göstermektedir [10].

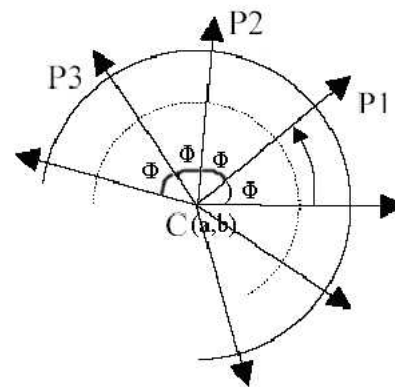


Şekil A-1. Parametre uzayında Hough Dönüşümü amaçlı koninin gösterimi

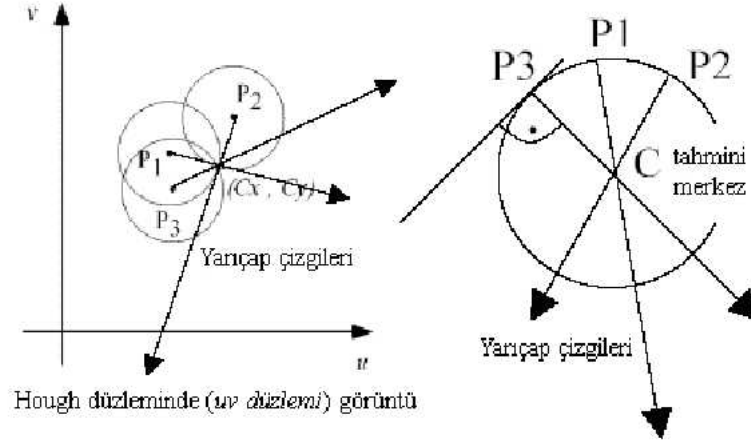
Görüntüde bir noktadan gradyan almak için, kenar bulma filtreleri (Sobel Filtresi, Roberts Filtresi ya da her ikisi birden) kullanılabilir. Bu filtreler uygulandığında, görüntüde sadece kenarları oluşturan görüntü elemanları (gör-em/piksel) kalmış olur. Görüntüde kalan bu piksellerin her biri bir çember üzerinde bir nokta olabilir [16].

Eğer görüntü $N \times M$ pikselden oluşuyor ve hedef yarıçap da r_{max} ile r_{min} arasında değişiyor ise, $N \times M \times |r_{max} - r_{min}|$ boyutunda parametre uzayımız var demektir. Bu durumda çemberin merkezini bulmada en fazla bir piksellik hata oluşacaktır (görüntünün en küçük elemanı 1 piksel genişliğinde olduğuna göre bu hata, aynı zamanda ulaşılabilir en düşük hatadır) [10].

Görüntüdeki her piksel bir merkez olabileceğine göre, bu merkezden (her noktadan) her yönde r uzaklıktaki noktaları bulmamız gerekir (Şekil A-2). Merkezden r uzaklıkta her yönde (örneğin aralarında Φ kadar açı olacak şekilde) çizilen doğrular, gradyana sahip herhangi bir P noktasıyla çakışırsa ve bu P noktalarının sayısı ne kadar çok ise o kadar iyi bir çember elde ederiz. Bunun tam tersi de mümkündür. Görüntüdeki her piksel bir çember üzerinde olabileceğine göre her P noktasından Φ kadar açı farkı ile her yönde bir doğru çizilirse ve bu doğrulardan bazıları r uzaklıkta çakışırsa bu çakışma noktası çemberin merkezidir (Şekil A-3) [14].



Şekil A-2. Çembersel yapının merkeziden yarıçap uzunluğu kadar uzaklıktaki noktaların belirlenmesi gösterilmektedir. (C) merkezinden Φ kadar açıyla ve farklı yönlerde çizilen doğrular r kadar uzaklıkta görüntüdeki noktalar ile çakışırsa ve bu noktalar ne kadar çok ise o kadar belirgin bir çember elde edilmiş olur [14].



Şekil A-3. Hough uzayında, Denklem 3'de verilen bağıntıya göre çizilen doğruların çakışma noktası görüntüdeki çembersel yapıların merkezini oluşturduğu gösterilmektedir [14].

Çemberin merkez koordinatları (a, b) ve yarıçap r , Şekil A-3.(a)'da gösterilen $P_i (x_i, y_i)$ noktalarına göre çözülebilir. $(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2$ denklemi yeniden düzenlenirse [15]:

$$\begin{aligned} x^2 - 2xa + a^2 + y^2 - 2yb + b^2 &= r^2 \\ x^2 + y^2 &= 2xa + 2yb + d \end{aligned} \quad (4)$$

elde edilir. Bu denklemde $(r^2 - a^2 - b^2)$ yerine d yazılmıştır. 3 ayrı P noktası için, denklem 4'e göre aşağıdaki ifadeler yazılabilir:

$$\begin{aligned} 2x_1a + 2y_1b + d &= x_1^2 + y_1^2 \\ 2x_2a + 2y_2b + d &= x_2^2 + y_2^2 \\ 2x_3a + 2y_3b + d &= x_3^2 + y_3^2 \end{aligned} \quad (5)$$

Bu ifadeler birlikte değerlendirilerek çözüldüğünde: merkez koordinatları (a, b) için, aşağıdaki denklemleri bulunur;

$$a = \frac{\begin{vmatrix} x_2^2 + y_2^2 - (x_1^2 + y_1^2) & 2(y_2 - y_1) \\ x_3^2 + y_3^2 - (x_1^2 + y_1^2) & 2(y_3 - y_1) \end{vmatrix}}{4(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - 4(x_3 - x_1)(y_2 - y_1)} \quad (6)$$

$$b = \frac{\begin{vmatrix} 2(x_2 - x_1) & x_2^2 + y_2^2 - (x_1^2 + y_1^2) \\ 2(x_3 - x_1) & x_3^2 + y_3^2 - (x_1^2 + y_1^2) \end{vmatrix}}{4(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - 4(x_3 - x_1)(y_2 - y_1)} \quad (7)$$

Çemberin merkezi için ise ($i = 1, 2, 3$ olmak üzere);

$$r = \sqrt{(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2} \quad (8)$$

yazılabilir. Eğer bir $P_4(x_4, y_4)$ noktasının çember üzerinde olup olmadığını test etmek istersek

$$d = |(x_4 - a)^2 + (y_4 - b)^2 - r^2| \quad (9)$$

bağıntısı kullanılabilir. Burada d_4 sıfıra giderse, P_4 noktası çember üzerinde demektir [15].

