

# UZAKTAN ALGILANMI GÖRÜNTÜLERDE OBJE TESPİTİNDE VE SINIFLANDIRMASINDA DERİN ÖRNEKLEME TEMELLİ YAKLAŞIM

N. E. Öçer<sup>a,\*</sup>, U. Avdan<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Anadolu Üniversitesi, Yer ve Uzay Bilimleri Araştırma Enstitüsü, 26555 Eskişehir, Türkiye - (neocer, uavdan)@anadolu.edu.tr

**ANAHTAR SÖZCÜKLER:** Obje Tespiti, Sınıflandırma, Hava ve Uydu Görüntüleri, Derin Örnekleme

## ÖZET:

Uzaktan algılanmış görüntülerde obje tespiti ve sınıflandırma, hava ve uydu foto rafları analizi alanında en ilgi çekici konulardan olup doğal afet tespitinden tarım ve bitki örtüsü haritalamasına, çevresel görüntüleme deniz planlamasına kadar birçok dalda kendine yer bulmaktadır. Uzaktan algılama teknolojisinde gerçekleştiren ilerlemelerle, çok yüksek çözünürlüklü görüntülerin elde edilmesi başarımlı, böylelikle insan yapımı birçok nesnenin algılanıp ayırt edilmesi mümkün hale gelmiştir. Bu gelişmelere rağmen uzaktan algılama görüntülerinde obje tespiti ve denetimli sınıflandırma konusundaki insan becerisi ve müdahalesine duyulan gereksinimin fazlalığı önemli sorunlardan biri olarak halen mevcut bulunmaktadır. Bugüne kadar insan faktörünün azaltılmasına dair girişimlerde makine öğrenmesi öncelikli seçenek olmuştur. Bu yöntemle beraber obje tespiti bir sınıflandırma problemi olarak ele alınmaya başlanmıştır ve önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Bu yöntemle belirli bazı objelerin belirlenmesinde önemli başarılar elde edilmiştir olsa da insan yeteneklerine bağlılıkların halen fazla, makine öğreniminin sıvı olmasından dolayı pratiklik azaltmakta ve çıktı doğruluğu etkilenmektedir. Bu sorunlara bir çözüm alternatifi olarak gözüken, güncel makine öğrenme yaklaşımlarından olan derin öğrenme konsepti günümüzde görsel bilgisayar uygulamalarında, bilhassa özellik tasviri gibi alanlarda yeteneklerini göstermektedir. Özellik çıkarımında insan becerisine bolca gereksinim duyan tekniklerden farklı olarak derin öğrenmeyle elde edilen sonuçlar doğrudan derin mimarideki yapay sınırları yoluyla otomatik olarak elde edilmektedir. Ancak, umut vaat edici vasıflarına rağmen derin öğrenme konsepti halen kendisine uzaktan algılanmış görüntülerde obje tespiti konusunda hak ettiği yeri bulamamıştır. Buradan yola çıkarak, bu çalışmada, derin öğrenme temelli yaklaşımın uzaktan algılanmış görüntülerde obje tespiti ve sınıflandırma konularına nasıl uygulanabileceği ve diğer yöntemlerde kullanılan mevcut sorunların çözümüne ne gibi katkılar sağlayabileceği üzerinde durulmuştur.

## 1. GİRİŞ

Uzaktan algılanmış görüntülerde obje tespiti, hava ve uydu foto rafları analizi alanında en temel ve ilgi çekici konulardan biri olarak birçok uygulamada önemli rol oynamakta ve gün geçtikçe daha fazla ilgi toplamaktadır. Uzaktan algılamada obje tespiti, eldeki hava veya uydu foto rafında yer alan objelerin ait olduğu alakalı sınıfların belirlenmesini ve tahmini yapılan resimdeki objelerin konumlarının tespitini içermektedir. Bu kapsamdaki çalışmalarda “obje” terimi arabalar, gemiler, binalar gibi arka-plan ortamından bağımsız, keskin sınırlarla ayrılmış insan yapımı nesnelere olabildiği gibi arazi kullanımı/bitki örtüsü gibi kesin çizgileri olmayan sınırlara sahip ve arka-planından ayrılması zor, tabii yeryüzü cisimlerini de ifade eder. Uzaktan algılanmış görüntülerde obje tespiti doğal afet tespitinden tarım ve bitki örtüsü haritalamasına, çevresel görüntüleme deniz planlamasına kadar birçok alanda önemli bir rol oynamaktadır.

Uzaktan algılamada obje tespiti, objelerin dış görünüşlerinde büyük değişimlere yol açan görüntüleme noktası değişimi, görüntü blokajı, arka-plan karışıklıkları, aydınlatma, gölgeleme gibi çeşitli zorluklar içermektedir. Ayrıca her geçen gün sayısı ve kalitesi artan hava ve uydu foto rafları ve yeni uygulama alanlarında duyulan çeşitli gereksinimler uzaktan algılamada obje tespitini daha da önemli hale getirmektedir. Bu sorunlara çözüm arayışında olan coğrafi mekansal obje tespiti konusu neredeyse 40 yıldır yaygın olarak çalışılmaktadır. Landsat gibi düşük mekansal çözünürlüklü eski nesil uydu foto rafları, insan yapımı veya küçük doğal nesnelere tespit edilmesinde genellikle yetersiz kalması sebebiyle ara tirmacılar çoğunlukla

bu foto raflardan ancak bölgesel özellik çıkarımı yapmaya çabalamışlardır. Uzaktan algılama teknolojisindeki ilerlemelerle, çok yüksek çözünürlükte görüntü alabilen uydular ve hava araçları daha detaylı konumsal ve dokusal bilgiye ulaşmamızı artık mümkün hale getirmişlerdir. Böylelikle, bölgesel özellik çıkarımı bir yana, insan yapımı birçok nesne bu şekilde algılanabilir ve hatta metre-altı çözünürlük sayesinde bunların ayırt edilmeleri mümkün hale gelmiştir. Bu da objelerin otomatik tespitinde yeni olanakların önünü açmaktadır.

Uydu ve hava foto raflarında derin öğrenme türde objelerin tespiti için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. İlk çalışmalar, nesnelere denetimsiz bir yapıda, genellikle piksellerin gruplanıp kümelenecek ilgi bölgesinin oluşturulmasıyla başlayıp nesnelere, ekil ve spektral bilgilerine dayanarak tespitinin yapılması şeklindeydi. Bu çalışmaların ortak özelliği, obje tespitini genel bir şekilde ele almayı bina (Akçay ve Aksoy, 2010; Aytekin vd., 2012), yol (Chaudhuri vd. 2012; Huang ve Zhang, 2009; Ünsalan ve Sirmacek, 2012) gibi belirli obje sınıfına odaklanmalarınıdır. Mevcut obje tespit yöntemleri, ablone ve derin öğrenme temelli, bilgi bazlı, obje temelli görüntü analizi ve makine öğrenme temelli olacak şekilde dört ana grupta incelenebilir.

Makine öğrenimi alanında yaşanan gelişmelerle beraber obje tespiti bir sınıflandırma problemi olarak ele alınmaya başlanmıştır ve önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Bu yolla obje tespiti, nesne görüntülerindeki değişimleri ve farklı görüş açılarını

barındıran görüntüleri içeren eğitim verisi setlerinin sınıflandırıcı tarafından denetimli, yarı-denetimli veya zayıf-denetimli altyapılarda öğrenilmesiyle gerçekleştirilir. Sınıflandırıcının girdisi, görüntü içerisinde kayan pencereler (obje önermeleri) ve bunlara eşlik eden özellik temsilleri, çıktısı ise bunlara karşılık gelen tahmini yapılan etiketlerdir, objedir veya deşildir gibi. Görüntüde yer alan nesnelere dair, özellik çıkarımı, özellik birleştirilmesi ve boyut indirilmesi, ve sınıflandırıcı eğitimi bu yöntemde obje tespiti performansını belirleyen en kritik adımlardır.

Mevcut durumda, birkaç çalışmaya haricinde (Han vd., 2015; Tang vd., 2015), çoğrafi konumsal obje tespit yöntemlerinde halen insan becerileri ve sıfırlanabilir öğrenme-temelli yaklaşımlar hakimdirler (Chen vd., 2011; Zhang vd., 2014). Bu vasıflara sahip yöntemler belirli bazı objelerin belirlenmesi görevlerinde önemli başarılar elde etmiş olsalar da özellik tespitinde halen insanın büyük oranda müdahil olması gerekliliği obje tespitindeki pratikliği ve doğruluğu etkilemektedir. Özellikle görsel zorluklar arttıkça bu yöntemlerin betimleme yetenekleri giderek sınırlanmaktadır.

Tüm bunların yanında, sayı ve kalite olarak mevcut deşerlendirme kapasitesi ve yeteneklerinin çok üzerinde bir artışın yer aldığı uydu ve hava fotoğraflarının analizi denetimli öğrenme-temelli obje tespiti için sınıflandırıcıların eğitimi büyük miktarda manuel girilmiş ve hatasız ek açıklamalı verilere ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca, çok yüksek çözünürlüklü görüntüler genellikle havaalanı boyutundaki büyük objelerden taşınır gibi küçük objelere kadar geniş yelpazede birçok nesne içerdiğiinden büyük fotoğraf setlerindeki bunca çeşitliliğin manuel olarak açıklanabilmesi pahalı, çok zaman alıcı ve verimsiz olmaktadır. Bugüne kadar az sayıda çalışmada insan faktörünün azaltılmasına ilişkin girişimler başarı olmuştur (Bai vd., 2014). Bunların ortak yanı yarı-denetimli öğrenme tekniğini kullanmalarıdır. Bu tarz yöntemler, makine öğrenme algoritmalarının eldeki sınırlı sayıda etiketlenmiş örnekleri baz alınarak en bilgilendirici etiketlenmemiş örnekleri otomatik olarak çözümlendiğini kendi kendine öğrenme veya aktif öğrenme yaklaşımlarını uygular. Sonrasında bu seçilmiş etiketsiz örnekler ilk başta etiketlenmiş nesne sınıflandırıcısı eğitimi örnekleriyle bir araya getirilirler. Yarı-denetimli öğrenme metodları her ne kadar insan emeğini bir ölçüde azaltsa da bunlar halen kaçınılmaz olarak önemli sayıda manuel etiketlenmiş eğitim örneğine ihtiyaç duymaktadırlar.

## 2. UZAKTAN ALGILAMADA OBJE TESPİT YÖNTEMLERİ

ablon ve le tirme, bilgi, obje görüntü analizi ve makine öğrenme olarak dört temelde gerçekleştirilen hava ve uydu görüntülerinde obje tespitine dair son yıllarda artan sayıda çalışmaya literatürde kendine yer bulmuştur.

ablon ve le tirme temelli yöntemler obje tespitindeki en basit ve eski kategoridir. Optiksel uzaktan algılanmış görüntüler üzerinde ablon oluşturma ve benzerlik ölçümlerinin altyapısını oluşturduğunu bu yöntemin bir kolu olan katı ablon ve le tirmesini kullanarak binaların (Lefevre vd., 2007), kıyı kesiminin ve su tanklarının (Weber ve Lefevre, 2008), ve yolların (Chaudri vd., 2012) tespiti başarılmıştır. Basit ve uygulanması nispeten kolay olan bu yöntem ne var ki ölçülebilir, nesnenin rotasyonuna, ekleme ve bakış açısına bağımlıdır.

Aynı yöntemin farklı bir uyarlaması olan esnek ablon ve le tirmesiyle ise uçakların, gemilerin ve depolama tanklarının (Lin vd., 2015), havaalanlarının (Tao vd., 2011), binaların (Ahmadi vd., 2010), Sırmaçık ve Ünsalan, 2009), ve yolların (Niu, 2006) tespiti gerçekleştirilmiştir. Katı ablon yaklaşımdan daha esnek ve güçlü olan bu yöntem ekil bozunumlarıyla baş edebilse de ablon oluşturulurken ekil geometrisi ve parametreleri üzerine ön bilgi gerektirmekte olup yüksek maliyetlidir.

Uzaktan algılanmış görüntülerde obje tespiti konusunda yaygın olarak kullanılan diğer bir yol bilgi-temelli obje tespit yöntemidir. Hedef objelerin tespitinde en çok kullanılan iki bilgi türü geometri ve içerikle ilgili olanlardır. Geometrik bilgi temelli yaklaşım, objelerin genel ekil modellerindeki parametreleri ele alınarak tespit çalışırken içerik temelli yaklaşım, mekansal kısıtlamalar, objeler ve arka planları arasındaki ilişki veya objelerin komşu bölgelerle olan etkileşimine dair bilgileri kullanarak tahminde bulunur (Akçay ve Aksoy, 2010; Chaudhuri ve Samal 2008). Bu yöntemlerle köprüler (Chaudhuri ve Samal, 2008), binalar (Akçay ve Aksoy, 2010), kanallar (Tchoku, 1996), heyelanlar (Martha vd., 2011), yollar (Hu vd., 2007) ve taşınır (Moon vd., 2002) uzaktan algılanmış görüntülerde tespit edilmiştir. Bu yöntemdeki kısıtlamalar ise özellikle ön bilgilerin sisteme tanımlanması ve tespit kurallarının belirlenmesinin nesnel olmamasından kaynaklanmaktadır.

Son zamanlarda, metre-altı görüntüleri eğitimi ve kullanımının artmasıyla çok yüksek çözünürlüklü görüntülerin sınıflandırılması veya haritalandırılması konusunda yeni bir metodoloji haline gelen obje temelli görüntü analizi yöntemini kullanarak heyelan haritalaması (Feizizadeh vd., 2014) de eğitimi tespiti (Bontemps vd., 2008), bitki örtüsü ve toprak kullanımı (Blaschke vd., 2011) tespitleri başarı olmuştur. Bu yöntemin olumlu tarafları olarak ekil, doku, geometri ve içeriksel semantik özellikleri kaynağı olarak sonuç ulaştırılması ve çok farklı kaynaklardan gelen görüntülerin işlenebilmesi sayılabilirken segmentasyon sürecinde tam otomasyona dönük bir çözümün olmaması ve sınıflandırma kurallarının tanımları yapılırken uzman müdahalesinin gerekliliği bu yöntemi nesnel bir yapıya sahip olmaktan alıkoymaktadır.

Obje tespitinde insan faktörünü diğer yöntemlere göre azaltan ve nesne modellerinin otomatik belirlenmesine yönelik adımların atılması makine öğrenme tekniğini ölçeklendirilebilir ve uyarlanabilir olması sebebiyle diğer yöntemlere göre önemli bir avantaja sahip olup bu yöntemle gerçekleştirilen tespitler yüksek doğruluğa sahiptir. Bu yöntemi kullanarak havaalanı (Lei vd., 2012), bina (Arı ve Aksoy, 2014; Lei vd., 2012), deşer tespiti (Benedek vd., 2015), heyelan (Cheng vd., 2013), yol (Han vd., 2015), gemi (Bi vd., 2012), açığa çıkma (Malek vd., 2014), taşınır (Grabner vd., 2008) tespiti başarıyla gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemdeki zorluk ise sınıflandırıcının öğrenmesi için nesne içeren içermeyen çok sayıda eğitim örneğine gereksinim duyulması ve tespit doğruluğunun bu eğitim örneklerine bağımlı olmasıdır.

## 3. OBJE TESPİTİNDE DERİN ÖĞRENME YAKLAŞIMI

2006 yılında Hinton ve Salakhutdinov tarafından özellik öğrenimi ve derin öğrenme konusunda atılan çığır açıcı adımdan bu yana derin öğrenme konusu görsel bilgisayar uygulamalarında, ve bilhassa özellik tasvirisi gibi alanlarda gücü ve yeteneklerini göstermektedir. Özellik oluşturmada insan beceri ve müdahalelerini bolca içeren tekniklerden farklı olarak

derin öğrenmeyle elde edilen özellikler do rudan derin mimarideki yapay sınırları yoluyla otomatik olarak çıkarılmaktadır. Böylelikle bugüne kadar insan mühendisli i ve zakasının sırtındaki özellik tasarımının yükü artık yapay sınırları yapısına devredilmeye başlanmıştır. Bunun yanında, özellik tasvirinde geleneksel sınırları öğrenme yöntemleriyle (örneğin seyrek temsil kodlaması) mukayese edildiğinde sınırlarının derin mimarisi büyük bir potansiyel taşımaktadır.

Günümüzde uzaktan algılanmış görüntülerde obje tespitinde geleneksel yöntemlerin karşılaştığı en büyük problemlerden biri yüksek çözünürlüklü görüntülerin taşıdığı bilgiler nesnelere çok daha detaylı temsil ederken, mevcut obje detektörleri tarafından kullanılan özellik tanımlayıcılarının nesnelere yapısal bilgilerini karakterize etmek için yetersiz olmasıdır. Uzaktan algılamada nesnelere mekansal ve yapısal modellerinin tanımlanmaması, nesne tespiti konusunda muazzam bir anlam bozukluğuna neden olur. Uçak, araç ve havaalanları gibi insan yapımı nesnelere her zaman arka planlarından belirgin farkları olan iç yapısal özellik taşıyan gözlemlenebilir. Yetersiz özellik tanımlayıcı sorununu çözüp, görüntü içindeki mekansal ve yapısal bilgilerin çözümlenmesi için üst seviye özellik öğrenimine ihtiyaç vardır. Buna çözüm olarak, yapısal özellikleri çıkarmak için yalnızca insan tasarımına dayanan varolan çalışmaların aksine, düşük ve orta düzey özelliklerinden gelen mekansal ve yapısal modellerin otomatik olarak belirlenip, üst seviye özelliklerin denetimsiz temsil öğrenme yoluyla türetilmesi bir yaklaşıma öngörülebilmektedir. Bu amaçla, literatürde nesne ve konuma tanıma problemlerini çözmeye hünarlerini göstermiş olan derin Boltzmann makinesi (DBM) yöntemi, uzaktan algılamada obje tespitinde üst seviye özelliklerin çıkarılıp, öğrenilmesinde uygulanacak bir seçenek olarak görülebilmektedir. DBM, sınırlı Boltzmann makinesinin (RBM'ler) istiflenerek inşa edildiği derin yapıdaki bir sınırdır. Çok katmanlı bir DBM kullanılmasıyla, denetimsiz bir yapıda, orta düzeydeki özelliklerdeki yapısal ve mekansal modellerin yakalanıp, nesnelere karakterize ederek son derece yüksek doğrulukta tespitini mümkün kılan üst düzey özelliklerin çıkarımı mümkün gözükmemektedir.

Bunun yanında, literatürde uzaktan algılama görüntülerinde obje tespiti ve sınıflandırma konusundaki bir diğer önemli zayıf, denetimli sınıflandırmada eğitim verilerinin hazırlanmasında, objelerin tek tek, eksiksiz etiketlenmesinde insan payının büyük yer tutmasıdır. Zayıf denetimli öğrenme, sadece, eğitim setlerini oluşturmanın görüntülerdeki içeriğin hedef objeyi içerip içermediğini belirten ikili (binary) etiketlere ihtiyaç duyan, insan ek açıklamalarını önemli ölçüde azaltmaya aday, çok cazip bir seçenektir. Doğal manzara görüntülerinin analizinde birkaç zayıf denetimli öğrenme yaklaşımı kullanılmış olsa da (Deselaers, 2012; Zhu ve Shao, 2014) bu yöntemler uzaktan algılama görüntülerinde karşılaşılan, objelerin dış görünüşlerindeki detaylar ve arka plan karmaşıkları gibi zorlukları aşmak için tasarlanmadığından bugüne kadar çoğu mekansal obje tespitinde doğrudan kullanılmamıştır. Literatürdeki bu eksikliği giderilmesine yönelik olarak özgün bir zayıf denetimli öğrenme temelli obje tespit altyapısı geliştirilerek, sınıflandırma alanında insan faktörünü emsallerinden daha az etkileyen bir yaklaşımla uzaktan algılanmış görüntüler üzerinde birçok sınıftan objenin tespiti olarak tespit edilmesi, derin öğrenme konseptiyle gerçekleştirilmesi mümkün görünürken bir başarı artışı olarak gözlemlenmektedir.

#### 4. SONUÇ

Uzaktan algılamada obje tespiti ve sınıflandırma alanında, mevcut yöntemlerin doğruluklarını, maliyetini ve performansını etkileyen en önemli faktör süreçte insan dahlinin fazla olmasıdır. Makine öğrenme yaklaşımlarında her geçen gün yaşanan ilerlemelerle bu süreçteki insan payı giderek makinelere devredilmektedir. Bu yaklaşımın en güncel konularından olan derin öğrenme kavramı, görsel bilgisayar uygulamalarındaki ve özellik çıkarımındaki kabiliyetleriyle birçok alanda yeni gelişmelere kapı açmıştır. Fakat sahip olduğu tüm bu üstün vasıflara rağmen derin öğrenme konsepti halen kendisine uzaktan algılanmış görüntülerde obje tespiti konusunda hak ettiği yeri bulamamıştır. Bu çalışmada, literatürdeki geleneksel yöntemlere değinilerek, derin öğrenme temelli yaklaşımların bu alanda neden ve nasıl uygulanması gerektiği üzerinde durulmuştur.

#### KAYNAKLAR

- Akçay, H.G., Aksoy, S., 2010. Building detection using directional spatial constraints. In: Proc. IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Sympos., pp. 1932–1935.
- Aytekin, Ö., Erener, A., Ulusoy, I., Düzgün, S., 2012. Unsupervised building detection in complex urban environments from multispectral satellite imagery. Int. J. Remote Sens. 33, 2152–2177.
- Bai, X., Zhang, H., Zhou, J., 2014. VHR object detection based on structural feature extraction and query expansion. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 52, 6508–6520.
- Benedek, C., Shadaydeh, M., Kato, Z., Szirányi, T., Zerubia, J., 2015. Multilayer Markov Random Field models for change detection in optical remote sensing images. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 107, 22–37.
- Bi, F., Zhu, B., Gao, L., Bian, M., 2012. A visual search inspired computational model for ship detection in optical satellite images. IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. 9, 749–753.
- Blaschke, T., Hay, G.J., Weng, Q., Resch, B., 2011. Collective sensing: integrating geospatial technologies to understand urban systems—an overview. Remote Sens. 3, 1743–1776.
- Bontemps, S., Bogaert, P., Titeux, N., Defourny, P., 2008. An object-based change detection method accounting for temporal dependences in time series with medium to coarse spatial resolution. Remote Sens. Environ. 112, 3181–3191.
- Chaudhuri, D., Kushwaha, N., Samal, A., 2012. Semi-automated road detection from high resolution satellite images by directional morphological enhancement and segmentation techniques. IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens. 5, 1538–1544.
- Chen, Y., Nasrabadi, N.M., Tran, T.D., 2011c. Sparse representation for target detection in hyperspectral imagery. IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Observ. Remote Sens. 5, 629–640.
- Cheng, G., Guo, L., Zhao, T., Han, J., Li, H., Fang, J., 2013a. Automatic landslide detection from remote-sensing imagery using a scene classification method based on BoVW and pLSA. Int. J. Remote Sens. 34, 45–59.

- Deselaers, T., Alexe, B., Ferrari, V., 2012. Weakly supervised localization and learning with generic knowledge. *Int. J. Comput. Vis.* 100, 275–293.
- Feizizadeh, B., Tiede, D., Rezaei Moghaddam, M.H., Blaschke, T., 2014. Systematic evaluation of fuzzy operators for object-based landslide mapping. *South Eastern Eur. J. Earth Observation Geomatics* 3, 219–222.
- Grabner, H., Nguyen, T.T., Gruber, B., Bischof, H., 2008. On-line boosting-based car detection from aerial images. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 63, 382–396.
- Han, J., Zhang, D., Cheng, G., Guo, L., Ren, J., 2015. Object detection in optical remotesensing images based on weakly supervised learning and high-level feature learning. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 53, 3325–3337.
- Hinton, G.E., Salakhutdinov, R.R., 2006. Reducing the dimensionality of data with neural networks. *Science* 313, 504–507.
- Hu, J., Razdan, A., Femiani, J.C., Cui, M., Wonka, P., 2007. Road network extraction and intersection detection from aerial images by tracking road footprints. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 45, 4144–4157.
- Huang, X., Zhang, L., 2009. Road centreline extraction from high-resolution imagery based on multiscale structural features and support vector machines. *Int. J. Remote Sens.* 30, 1977–1987.
- Lefèvre, S., Weber, J., Sheeren, D., 2007. Automatic building extraction in VHR images using advanced morphological operators. In: *Proc. Urban Remote Sens. Joint Event*, pp. 1–5.
- Lei, Z., Fang, T., Huo, H., Li, D., 2012. Rotation-invariant object detection of remotely sensed images based on texton forest and Hough voting. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 50, 1206–1217.
- Malek, S., Bazi, Y., Alajlan, N., AlHichri, H., Melgani, F., 2014. Efficient framework for palm tree detection in UAV images. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Observ. Remote Sens.* 7, 4692–4703.
- Martha, T.R., Kerle, N., Van Westen, C.J., Jetten, V., Kumar, K.V., 2011. Segment optimization and data-driven thresholding for knowledge-based landslide detection by object-based image analysis. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 49, 4928–4943.
- Moon, H., Chellappa, R., Rosenfeld, A., 2002. Performance analysis of a simple vehicle detection algorithm. *Image Vis. Comput.* 20, 1–13.
- Tchoku, C., Karnieli, A., Meisels, A., Chorowicz, J., 1996. Detection of drainage channel networks on digital satellite images. *Int. J. Remote Sens.* 17, 1659–1678.
- Ünsalan, C., Sirmacek, B., 2012. Road network detection using probabilistic and graph theoretical methods. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 50, 4441–4453.
- Weber, J., Lefèvre, S., 2008. A multivariate hit-or-miss transform for conjoint spatial and spectral template matching. In: *Proc. IEEE Int. Conf. Image Signal Process.*, pp. 226–235.
- Tang, J., Deng, C., Huang, G.-B., Zhao, B., 2015. Compressed-domain ship detection on spaceborne optical image using deep neural network and extreme learning machine. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 53, 1174–1185.
- Zhang, L., Zhang, L., Tao, D., Huang, X., 2014a. Sparse transfer manifold embedding for hyperspectral target detection. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 52, 1030–1043.
- Zhu, F., Shao, L., 2014. Weakly-supervised cross-domain dictionary learning for visual recognition. *Int. J. Comput. Vis.* 109, 42–59.