

Farklı alıcılardan elde edilen uydu görüntülerinin çakıştırılmasında başarımların artırma ve değerlendirme ölçütleri **

Deniz Gerçek*, Davut Çeşmeci, Mehmet Kemal Güllü, Alp Ertürk, Sarp Ertürk

Kocaeli Üniversitesi İşaret ve Görüntü İşleme Laboratuvarı (KULIS), Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü,
Umuttepe Yerleşkesi, Kocaeli, Türkiye

Özet

Farklı uydu alıcılarından alınan görüntülerin hassas biçimde çakıştırılmasında parlaklık temelli yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Buna göre, ötelenerek birbiri ile karşılaştırılan görüntü parçalarında, benzerlik ölçütünü enyükseltmek için, en iyi çakıştırma olarak kabul edilir. Çakıştırmanın kalitesi özellikle imge kaynaştırma, değişim tespiti, çok kanallı bölütleme, Sayısal Arazi Modeli (SAM) üretimi vb. çalışmalar için kritik öneme sahiptir. Çakıştırma başarımları genellikle hedef imge ve referans / yer doğrusu üzerinde bulunan ortak nesne koordinatlarının karşılaştırılmasından elde edilen hata ölçütleri ile (ör. RMSE) ile değerlendirilir. Ancak, özellikle farklı alıcılardan elde edilen görüntülerde düşük çözünürlüklü bir bileşen var ise, kontrol noktalarını konumlandırmadaki güçlük, çakırtmada piksel altı başarımları düşürmekte ve çakıştırma değerlendirmesini zorlaştırmaktadır. Bu çalışmada farklı alıcı karakteristiklerine sahip görüntülerin parlaklık temelli otomatik yöntemlerle çakıştırılmasında yaygın olarak kullanılan üç yöntem; Normalize Çapraz Korelasyon (NCC), Ortak Bilgi (MI) ve Faz Korelasyonu (PC), EO-1 Hyperion ve IKONOS alıcılarından elde edilen görüntüleri çakırtmak üzere test edilmektedir. Her bir yöntemle elde edilen çakıştırma sonuçlarının başarımlarını değerlendirmek üzere, 'global benzerlik' ve 'ters tutarlılık' ölçütlerinin kullanımı önerilmektedir.

Anahtar Sözcükler

İmge çakıştırma, Parlaklık temelli, Benzerlik ölçütü, Başarımların değerlendirme, Hyperion, IKONOS.

Abstract

Accuracy improvement and evaluation measures for registration of multisensor remote sensing imagery

Intensity based image registration methods are widely used in fine geometric registration of multisensor images. Accordingly, for images that are compared through translation of image templates, position where similarity measure is maximized is assumed to indicate best registration. Image registration quality is of crucial importance especially for studies that have high geometric accuracy requirements; e.g. image fusion, change detection, multichannel segmentation, and Digital Terrain Model (DTM) generation. Accuracy of image registration is conventionally evaluated by means of error measures (e.g. RMSE) obtained through comparison of coordinates of control points from the target and the reference / ground truth. However, especially for multisensor images with low spatial resolution component, difficulty in precisely positioning control points inhibits both sub pixel accuracy and evaluation of the registration. In this study, three widespread measures in intensity-based image registration namely, Normalized Cross Correlation (NCC), Mutual Information (MI), and Phase Correlation (PC) are tested for registering images acquired from EO-1 Hyperion and IKONOS sensors. We propose the use of 'global similarity' and 'inverse consistency' measures for evaluating the performance of these intensity based automated registration methods.

Keywords

Image registration, Intensity-based, Similarity measure, Accuracy assessment, Hyperion, IKONOS.

Web Yayın: 12 Mart 2013

Cilt: 1
Sayı: 2
Sayfa: 131 - 137
Kasım 2012

Pub. Online: 12 March 2013

Volume: 1
Issue: 2
Page: 131 - 137
November 2012

** Hakemli değerlendirme sürecinden geçerek, Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi'nde yayına kabul edilen ve asıl yazı dili İngilizce olan "Accuracy improvement and evaluation measures for registration of multisensor remote sensing imagery" başlıklı eserin Türkçe diline çevirisidir. Çeviren; Deniz Gerçek.

*Sorumlu Yazar: Tel: +90 (262) 3033392 Fax: +90 (262) 3033003

E-posta: deniz.gercek@kocaeli.edu.tr (Gerçek D.), davutscmc@gmail.com (Çeşmeci D.), kemalg@kocaeli.edu.tr (Güllü M.K.), erturk.alp@gmail.com (Ertürk A.), sertur@kocaeli.edu.tr (Ertürk S.),

1. Giriş

Farklı uydu alıcılarından elde edilen görüntülerin analizi uzaktan algılamada belli başlı bir ilgi alanı olmuştur. Farklı uydulardan, farklı bakış açılarından veya farklı zamanlarda elde edilen görüntülerin bir araya getirilmesi bazı çalışmalar için kritik öneme sahiptir. Ancak, farklı modalite/alıcı özellikleri, görüntülerin birleştirme veya karşılaştırma için ortak bir temele getirilmelerinde aşılması gereken bir sorundur. Bu bağlamda, görüntülerin birbiri ile çakıştırılması temel ve öncelikli bir işlemdir. Bununla beraber, bazı çalışmalar ör. veri/ imge kaynaştırma (Mitianoudis ve Stathaki 2007; Yokoya vd. 2012), çözünürlük iyileştirme (Eismann ve Hardie 2008), değişim analizi (Dai ve Khorram 1998), stereo yüzey modellemesi (Baltsavias vd. 2008) niceliksel değerlendirmeleri gerekli kılan daha yüksek başarımlar gerektirirler. Bu tür çalışmalar için çakıştırmada düşük çözünürlüklü görüntüye ait piksel büyüklüğünün 0.1-0.2'sini aşmayan geometrik hatalar kabul edilebilirlik düzeyidir (Dai ve Khorram 1998; Zhukov vd. 1999).

İmge çakıştırma başarımları, hedef ve referans imgede ortak olan kontrol noktalarının arasındaki hatanın ölçülmesi ile değerlendirilir. Ancak, özellikle çok farklı çözünürlüklere sahip uydu görüntüleri için yüksek çözünürlüklü ve düşük çözünürlüklü görüntülerde ortak kontrol noktalarını hassas biçimde yerleştirmek imkânsız gibidir. Bu yüzden, başarımları değerlendirmek için bir temel standart olmadığı söylenebilir.

İmge çakıştırma farklı kaynaklardan, farklı açı veya farklı zamanlarda elde edilen imge/görüntülerin geometrik olarak eşleştirilmesi olarak tanımlanır (Brown 1992). Farklı özelliklere sahip uyduların artışı ile birlikte farklı uydu alıcılarından elde edilen görüntülerin çakıştırılması son zamanların öne çıkan araştırma konularından olmuştur. An itibarıyla çok sayıda yer gözlem uydusu bulunmaktadır. GeoEye ve Digital Globe yüksek uzamsal çözünürlüklü görüntü sağlayan belli başlı ticari uydu organizasyonlarıdır. Hiperspektral görüntüler ise geniş bir spektrumda birbirinin devamı dar bant aralıklarında yüksek spektral çözünürlük sağlarlar. Bu sebeple, hedef tespiti ve sınıflandırmada çok bantlı (multispektral) görüntülere göre üstünlükleri bulunmaktadır. Ancak, hiperspektral görüntüler yakın gelecekte de devam edeceği öngörülen bazı teknik kısıtlardan dolayı düşük uzamsal çözünürlüğe sahiptirler (Thomas vd. 2008). Bu durum, hiperspektral görüntülerin uzamsal çözünürlüğünün iyileştirilmesi çalışmalarını teşvik etmektedir. Hiperspektral ve optik multispektral görüntüler aynı zamanda birbirinin tamamlayıcısı özelliğe sahiptir. Çünkü hiperspektral görüntüler yüksek spektral ve düşük uzamsal çözünürlüğe sahiptir, multispektral görüntüler ise bunun aksine yüksek uzamsal ve düşük spektral çözünürlüğe sahiptir. Bu nedenle, farklı alıcılardan elde edilen görüntü analizinde, görüntülerin birbirleri ile çok iyi çakıştırılması kaydıyla, yüksek spektral-uzamsal çözünürlüğe sahip içerik elde edilmesi beklenir.

Bu çalışmada, Hyperion ve IKONOS görüntülerinin kaynaştırılması öncesinde yüksek başarımlı imge çakıştırma işlemi önerilmektedir. Farklı kaynaklardan alınan bilgilerin sentezi, bu bilgilerin birlikte kullanımından elde tutulur ölçüde daha fazla bilgi elde edilmesini sağlar (Bunting vd. 2010). Ancak, kullanılacak görüntülerin özellikle çözünürlüklerinde büyük farklar var ise kaynaştırma işlemi bir o kadar zorlaşacaktır.

İmge kaynaştırmada yüksek çözünürlüklü imge ile düşük çözünürlüklü imgenin çözünürlükleri oranına 'uzamsal çözünürlük oranı' denilmektedir. Uzamsal çözünürlük oranının kaynaştırılmış görüntünün kalitesini etkilediği bilinmektedir. Deneysel sonuçlar genellikle 1/10'dan yüksek bir uzamsal çözünürlük oranının arandığını göstermektedir (Ling vd. 2008).

Bilgi çıkarımı veya sınıflandırma amaçlı imge kaynaştırma yaklaşımlarında, yüksek çözünürlüklü içerik, düşük çözünürlüklü imgenin tüm bantlarına çeşitli deterministik veya istatistik yöntemlerle ve uzamsal uzay (spatial domain) teknikleri kullanılarak aktarılır (Zhukov vd. 1999; Yokoya vd. 2012). Yüksek çözünürlük ayrıca yüksek çözünürlüklü imgeden nesne tabanlı analizler ile elde edilen nesnelere yoluyla da entegre edilebilir (Mitianoudis ve Stathaki 2007).

İmge çakıştırma yaklaşımları genel olarak öznitelik temelli ve parlaklık temelli olmak üzere ikiye ayrılır (Zitova ve Flusser 2003). Öznitelik temelli yaklaşımlar hem hedef hem de referans görüntüde konumlandırılan kontrol noktalarına ihtiyaç duyar. Ancak farklı çözünürlüklerdeki görüntüler için bu çok mümkün olmadığından, bu çalışmada görüntüleri çakıştırırken görüntülerin parlaklık özelliklerini karşılaştıran parlaklık temelli yaklaşımlar üzerinde yoğunlaşmıştır.

Parlaklık temelli yaklaşımda kullanılan yöntemlerin her biri 'global benzerlik' ve 'ters tutarlılık' ölçütleri ile değerlendirilmiştir. Dönüştürülmüş hedef ve referans arasındaki global benzerlik, çakıştırmada yüksek başarımların göstergesi olarak kabul edilmiştir. Benzer şekilde, ileri ve geri dönüşümün tutarlılığı da daha başarılı sonuçların göstergesidir.

2. İmge çakıştırma yöntemleri ve başarımların değerlendirme ölçütleri

İmge çakıştırmanın bilgisayarla görme, tıbbi görüntüleme ve uzaktan algılama gibi alanları içeren geniş bir uygulama sahası bulunmaktadır. Son 20 yıl içerisinde elde edilebilen görüntülerin çeşitliliğindeki artış, aynı bölgelere ait farklı özelliklere sahip görüntülerin çakıştırılması konusundaki araştırmaları öne çıkarmıştır. İmge çakıştırma ile ilgili son 20 yılda meydana gelen gelişmeler ve temel yaklaşımların genel bir görünümü için Brown (1992), Zitova ve Flusser (2003), Wyawahare vd. (2009) ve Gruen (2012)'ye başvurulabilir.

İmge çakıştırma yaklaşımları genel olarak öznitelik temelli ve parlaklık temelli olmak üzere ikiye ayrılır (Zitova ve Flusser 2003). Öznitelik temelli yaklaşımlar farklı görüntülerdeki kontrol noktalarının manuel veya otomatik (ör. SIFT, Harris) yaklaşımlarla tespit edilmesine dayanır. Parlaklık temelli yaklaşımlar daha ziyade hedef ve referans imge arasında bir benzerlik ölçütü kullanır ve en iyi çakışma gerçekleştiğinde benzerliğin en yüksek olacağı varsayımına dayanarak benzerlik ölçütü en yükseklenene kadar öteleme/döndürme vb. dönüşümleri sürdürür.

Parlaklık temelli yaklaşımlar özellikle öteleme veya dönme etkilerini gidermede etkindir, bu nedenle genellikle katı (rigid) bozulmaların gözlemlendiği tıbbi görüntülerin dönüştürülmesinde geniş uygulama bulur (Pluim vd. 2003). Ancak, lokal bozulmalara maruz kalmış uydu görüntülerinin çakıştırılmasında parlaklık temelli yaklaşımlar genellikle başarısız olma eğilimindedir. Bu sorunu aşmak için yaygın olarak başvurulan bir yöntem, hedef ve referans görüntüyü, görüntü-

nün içinde gezen bloklar yoluyla karşılaştırmaktır. Buna alan veya blok temelli yaklaşım denilmektedir (İnglada ve Giros 2004). Benzerlik ölçütleri hedef ve referans bloklarının benzerliğini bir tampon bölge içinde öteleme ile hesaplayarak en yüksek benzerliğin hangi ötelemede olduğunu bulurlar. Bu ötelemeler daha sonra hedef görüntüyü referans görüntüye göre dönüştürmek için kullanılır.

Literatürde imge çakıştırma yaygın olarak kullanılan üç benzerlik ölçütü; Normalize Çapraz Korelasyon (Normalized Cross-Correlation - NCC), Ortak Bilgi (Mutual Information - MI) ve Faz Korelasyonu (Phase Correlation - PC) bu çalışma için uygulanmış ve test edilmiştir.

2.1 Parlaklık temelli çakıştırma kullanılan benzerlik ölçütleri

Normalize Çapraz Korelasyon (Normalized Cross Correlation - NCC) özellikle aynı modalite/alcı özelliklerindeki imgelerin çakıştırılmasında kullanılan yaygın bir yöntemdir. Eşitlik 1 de ifade edilen korelasyon katsayısı 'r' ölçüt olarak kullanılır ve en yüksek değeri aldığı en iyi çakışmanın gerçekleştiği kabul edilir.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c [(B_1(i, j) - \mu_1) * (B_2(i, j) - \mu_2)]}{\sqrt{(B_1(i, j) - \mu_1)^2} \sqrt{(B_2(i, j) - \mu_2)^2}} \quad (1)$$

r korelasyon katsayısıdır ve μ ilgili bloğun 'B' ortalama değeridir.

Ortak Bilgi (Mutual Information - MI) 'bilgi teorisi' kökenli ve NCC de olduğu gibi imge çiftlerinin doğrusal ilişkiliğine değil, istatistiksel bağımlılığa dayalı bir ölçüttür. Bu nedenle, özellikle farklı modalite/alcıların çakıştırılmasında etkindir (Fookes ve Bennamoun 2002). MI, bu bağımlılığı Eşitlik 2 de verildiği gibi marjinal entropi ile birleşik entropi arasındaki fark olarak hesaplar ve değer en yüksek olduğunda en iyi çakışmanın gerçekleştiği varsayılır. Eşitlik 3'te verilen Normalize Ortak Bilgi'nin (NMI), MI'ya göre daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir (Suganya vd. 2010).

$$MI(B_1, B_2) = H(B_1) + H(B_2) - H(B_1, B_2) \quad (2)$$

$$MI(B_1, B_2) = H((B_1) + H(B_2)) / H(B_1, B_2) \quad (3)$$

Shannon Teorisine göre iki rastgele değişkenin marjinal ve bileşik entropisi sırasıyla Eşitlik 4 ve 5'te verilmiştir.

$$H(B_1) = \sum_a -P_{B_1}(a) \cdot \log P_{B_1}(a) \quad (4)$$

$$H(B_1, B_2) = \sum_{a,b} -P_{B_1, B_2}(a, b) \cdot \log P_{B_1, B_2}(a, b) \quad (5)$$

Buna göre, a ve b her iki imgede birbirine eş piksellerin parlaklık değeridir. $P_G(\cdot)$ ise belli bir parlaklık değerinin imge bloğu 'B' de bulunma olasılığıdır.

Faz Korelasyonu (Phase Correlation - PC) Fourier öteleme özelliğine dayalı (Yan ve Li 2008) frekans uzayı temelli bir benzerlik ölçütüdür. Eğer $B_1(i, j)$ ve $B_2(i, j)$ iki imge bloğunu ifade ederse, $X_1[u, v]$ ve $X_2[u, v]$ ilgili ayrık Fourier

dönüşümlerini (Discrete Fourier transforms -DFTs) gösterir. Faz korelasyonu Eşitlik 6'da formülize edilmiştir.

$$S[n] = F^{-1} \left[\frac{X_1[u, v] \times X_2^*[u, v]}{|X_1[u, v] \times X_2^*[u, v]|} \right] \quad (6)$$

F^{-1} ters ayrık Fourier dönüşümü ifade eder. Fourier dönüşümünden önce kenar etkilerini gidererek başarıyı artırmak üzere genellikle bir pencereleme işlemi ör. Hamming kullanılır (Stone vd. 2001; Keller ve Averbuch 2007).

Eğer her iki imge de birbirinin aynı ise; $B_1(i, j) = B_2(i, j)$, faz korelasyonu (i, j) = 0 de bulunan zirve olarak kabul edilir. Ancak, bu çalışmada olduğu gibi çakıştırılacak görüntüler görüntü, parlaklık farklılıkları, vb. etkiler yüzünden birbirinin aynı olamayacağından, zirve yüksekliği çakıştırma için benzerlik ölçütü olarak alınır.

Faz korelasyonunun imge çakıştırma kullanımını uygun hale getiren önemli bir özelliği de eğer iki imge sadece öteleme etkisi ile birbirlerinden farklıysalar, bu ötelemenin miktarı Eşitlik 7 ve 8' de verilen Faz korelasyonu formülü ile ifade edilebilir.

$$B_2(i, j) = B_1(i - t_1, j - t_2) \quad (7)$$

$$S[i, j] = F^{-1} \left[\frac{X_1[k] \times (X_1[k] \times e^{-t_1 i u} e^{-t_2 i v})^*}{|X_1[k] \times (X_1[k] \times e^{-t_1 i u})^*|} \right] = \delta[i - t_1, j - t_2] \quad (8)$$

2.2. İmge çakıştırma başarımlı değerlendirme ölçütleri

Ters tutarlılık (Inverse Consistency): Çakıştırmanın tutarlılığı dönüşümün tersi alınabilirlik (invertibility) özelliği ile değerlendirilebilir. 'İleri dönüşüm', hedefin referansa uyacak şekilde dönüştürülmesi ve 'ters dönüşüm' referansın hedefe uyacak şekilde dönüştürülmesi olarak tanımlanır. İdeal olarak, ileri dönüşüm 'ters dönüşümün tersi' ne eşit olduğunda tutarlı dönüşüm ortaya çıkar (Christensen vd. 2006). Ancak, bu durum gerçek imge çakıştırma problemleri için genellikle geçerli olmayacaktır. Tutarlılık, benzerlik ölçütünün imgeler arasındaki ilintiyi iyi ifade edemediği durumlarda ortaya çıkar (Christensen ve Johnson 2001). Ters tutarlılık ileri ve ters dönüşüm arasındaki Ortalama Kare Hata Karekökü (Root Mean Squared Error - RMSE) gibi bir hata istatistiği ile tanımlanır.

Global Benzerlik (Global Similarity): Parlaklık temelli yöntemler hedef ve referans imge arasındaki parlaklık benzerliğini optimize etmeyi amaçlar. Global benzerlik ölçütü dönüştürülmüş hedef imge ile referans imgenin birbirine parlaklık değerleri açısından benzer olacağı varsayımına dayanır. Yüksek benzerlik, her ne kadar garanti edilmese de iyi çakıştırmanın işareti olarak kabul edilir (Zitova ve Flusser 2003).

3. Materyal ve çalışma alanı

Hiperspektral uydu ile yer gözlemi günümüzde NASA'nın yer gözlem sistemi EO-1 Hyperion (Url-1) ve ESA'nın görür-

nür ve yakın kızılötesinde görüntü sağlayan araştırma odaklı CHRIS/Proba (Url-2) alıcılı ile sınırlıdır. EO-1 Hyperion uydusunun 200'den fazla bandı vardır; görünür, yakın ve orta kızılötesi bölgede 30 m çözünürlüğünde görüntü sağlamaktadır.

Günümüzde yüksek çözünürlüklü görüntü sağlayan çok sayıda uydu vardır. Bu çalışmada IKONOS multispektral uydu görüntüsü kullanılmıştır. IKONOS görüntüsünün (Url-3) 4 m çözünürlüklü dört adet spektral ve 1 m çözünürlüklü bir pankromatik bandı vardır.

Bu çalışmada 30 m uzamsal çözünürlüğündeki görünür bölgede Hyperion bantları ve 4 m uzamsal çözünürlüğündeki IKONOS kırmızı, yeşil, mavi (R, G, B) bantları kullanılmıştır. IKONOS ve Hyperion görüntüleri arasındaki uzamsal çözünürlük oranı 1/7.5'tir. Görünür bölgede yer alan Hyperion bantları çakıştırma işleminin yüksek spektral çözünürlük bileşeni olarak kullanılmıştır. Geometrik dönüşümde kullanılmak üzere elde edilen deformasyon gridi daha sonra Hyperion'a ait yakın ve kısa dalga kızılötesi bantlarını da içeren tüm bantların dönüştürülmesinde kullanılabilir.

Çalışmada kullanılan görüntüler 2007 yazına aittir ve Hyperion ile IKONOS görüntüsü arasında 5 haftalık zamansal fark bulunmaktadır. Çalışma alanı İstanbul'un 45 km kadar kuzey-batısında, Durusu (Terkos Gölü) yakınlarındadır. Tarım alanları, orman, Durusu yerleşimi ve Karadeniz'in bir kısmını kapsayan alan yaklaşık 5 km² büyüklüğündedir (Şekil 1).

Hyperion ve IKONOS görüntüleri farklı alıcılardan elde edildikleri için farklı modalitelere sahiptir. Bunlar; farklı uzamsal çözünürlük, farklı spektral çözünürlük ve zamansal değişime bağlı parlaklık değişimleridir. IKONOS görüntüsü ortorektifiye edilmiştir. Ancak, Level 1gst normundaki Hyperion görüntüsü ortorektifiye olarak bildirilmekle beraber (URL -1) ortorektifikasyonda kullanılan Sayısal Arazi Modeli (SAM)'in düşük çözünürlükte olmasından kaynaklanmış olabileceği düşünülen nedenlerle lokal geometrik bozulmalara sahiptir. Bu çalışma için her iki görüntüde dikkat edilmesi gereken farklı modaliteler/sensör özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: Çalışmada kullanılan Hyperion ve IKONOS görüntülerinin farklı sensör özellikleri

	Hyperion	IKONOS
Spektral çözünürlük	Görünür bölge (R, G, B) aralığına giren 29 bant (8-36)	3 bant (R,G,B, multispektral)
Uzamsal çözünürlük	30 m	4 m
Paralaks	Level 1gst (ortorektifiye, düşük çöz. SAM)	ortorektifiye
Görüntü tarihi	08 Temmuz 2007	30 Mayıs 2007

4. Yöntem

Hedef ve referans bloklarının parlaklık benzerliğini esas alan piksel tabanlı bir çakıştırma yöntemi önerilmiştir. IKONOS görüntüsü hedef, Hyperion görüntüsü referans olarak alınmıştır ve aynı zamanda başarımların değerlendirmesi için yer doğrusu olarak kabul edilmiştir. IKONOS görüntüsü doğru geometriye sahip ortorektifiye bir görüntü olmasına rağmen, hedef olarak kullanılmış ve Hyperion görüntüsüne eşleştirilmeye çalışılmıştır. Bunun sebebi, daha sonra spektral analizlerde kullanılacak olan Hyperion verisinin radyometrisini yeniden örnekleme vb. işlemlerle bozmaktan kaçınılmasıdır. En iyi eşleşme/çakışma her Hyperion pikseli için kaydedilmiş ve deformasyon gridi oluşturmak üzere hareket vektörü (displacement vector) olarak kullanılmıştır. Deformasyon gridi yapı olarak optik akış şemasına benzer ve deformasyonun hedef görüntüde lokal olarak en aza indirgenmesi için kullanılır. Daha sonra, geometrik dönüşüm her bir IKONOS pikselini 30 m örnekleme sahip deformasyon gridini esas alarak en yakın 4 hareket vektörünün ağırlıklı ortalaması kadar kaydırarak yeniden örnekleme ile tekrar yerleştirir.

Yöntem IKONOS'un R, G, B bantlarına ve Hyperion'un sentetik R, G, B denklemlerine uygulanmıştır. Tüm işlemler MATLAB'da gerçekleştirilmiştir.



a



b

Şekil 1: (a) IKONOS RGB kompozit ve (b) Hyperion Sentetik RGB (bkz. Bölüm 4.1) kompozit görüntüleri

4.1 Önişlemler

4.1.1 Spektral normalizasyon

Hyperion görüntüsü 10 nm bant aralığına sahiptir. IKONOS ise daha geniş spektral yanıtılığa sahip bantlardan oluşmaktadır. Çalışmada kullanılan görünür bölge bantları R, G, B; Hyperionda sırasıyla 8-17, 16-27 ve 27-36 bantlarına denk gelmektedir. Her iki görüntü arasında direkt radyometrik karşılaştırmalar yapabilmek için görüntülerin spektral çözünürlüklerinin denkleştirilmesi gerekmektedir. IKONOS R, G, B bantlarına karşılık gelen sentetik Hyperion bantları oluşturmak için IKONOS alıcısının spektral yanıtılık fonksiyonunu (Spectral Response Function - SRF) temsil eden Gauss eğrileri kullanılmıştır. Bu eğrilerden elde edilen katsayılar Hyperion bantlarının ağırlıklı toplamından sentetik R, G, B bantları oluşturulmasını sağlamıştır.

4.1.2 Uzamsal normalizasyon

Hyperion ve IKONOS görüntülerinin parlaklık benzerliğinin hesaplanabilmesi için eşit uzamsal çözünürlüğe getirilmeleri gerekmektedir. 4 m çözünürlüğündeki IKONOS spektral bantları 30 m çözünürlüğe alt örneklenmiştir. Alt örneklemeden önce örtüşme (aliasing) etkisini gidermek için örnekleme oranının iki katı pencere büyüklüğünde bir alçak geçiren filtre uygulanmıştır. Benzerlik ölçütünün hesaplanışında, her öteleme için IKONOS görüntüsü alt örnekleterek Hyperion görüntüsünün çözünürlüğüne getirilmektedir.

4.2 IKONOS görüntüsünün ötelenmesi

4.2.1 Blok büyüklüğünün belirlenmesi

IKONOS blokları için uygun bir büyüklük belirlenmelidir. Blok büyüklüğü anlamlı istatistikler üretebilecek kadar büyük olmalıdır ve görüntüdeki nesnelere yakalayamayacak kadar küçük olmamalıdır. Bu kritik ölçü, aynı fenomene ait birbirine yakın mesafedeki gözlemlerin birbirine benzer olacağı ilkesine dayanan 'uzamsal otokorelasyon' (Griffith 2003) ölçütü ile belirlenmiştir. Uzamsal otokorelasyonun var olduğu uzaklık, görüntüdeki nesne büyüklükleri ile ilgili bilgi verebilir. Uzamsal oto korelasyonda genel bir ölçüt olarak kullanılan Geary oranı (Geary Ratio-GR) (Geary 1954) ve nokta çiftleri arasındaki uzaklığa dayalı ampirik bir varyog-

ram oluşturulmuştur. Ampirik varyogramda oturtulan üstel (exponential) modelin 'range' adı verilen uzaklık sınırında yükselme eğilimi durmuştur. 'Range' değeri piksellerin değerlerinin artık birbiri ile bağlantılı olarak değişmediği, yani uzamsal otokorelasyonun bittiği mesafeyi gösterir. Bu mesafe çalışma için blok büyüklüğü olarak alınmıştır. 'Range' değeri bu çalışma için 950 m' dir, bu da 30 m'lik piksellere sahip olan Hyperion görüntüsü için yaklaşık 31x31 piksellik bloklara eşdeğerdir.

4.2.2 Öteleme

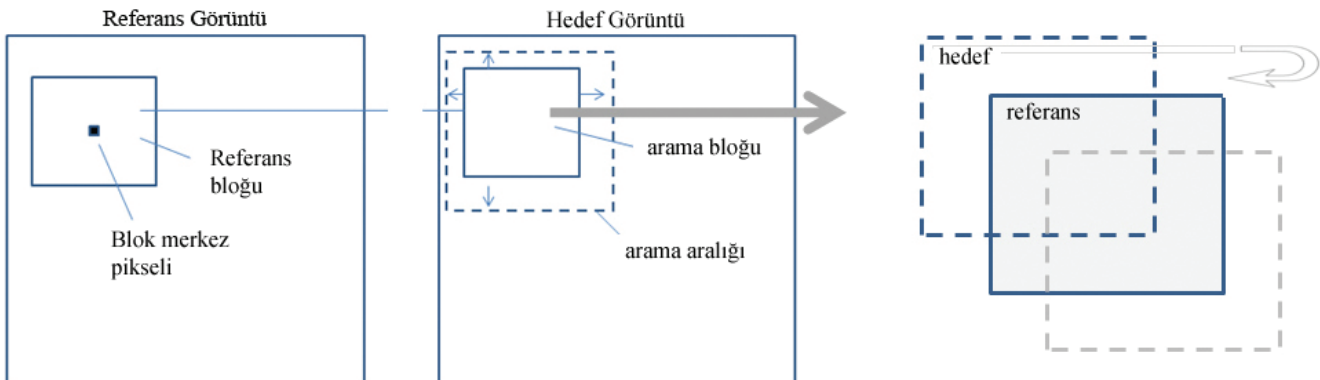
Belirlenen büyüklükteki bloklar -45 +45 m aralığında her seferinde 1 m ötelenmiştir. 45 m, 1.5 Hyperion pikseline eşdeğerdir ve iki görüntü arasında gözlenen maksimum lokal kayma miktarını karşılamaktadır. Öteleme referans görüntünün her bir pikselini merkez alan blokların x ve y yönlerinde kaydırılması ile gerçekleşir (her piksel için $90 \times 90 = 8100$ toplam öteleme hareketi) (Şekil 2). Her öteleme sonrasında bir önceki bölümde bahsedilen altörnekleme (bölüm 4.1.2) işlemi gerçekleştirilir. Her bir öteleme için hedef ve referans bloğu arasındaki benzerlik NCC, MI (MI ve NMI) ve PC ölçütleri kullanılarak hesaplanmıştır. PC işleminden önce kenar etkisini gidermek için genellikle bir pencereleme işlemi uygulanır (Stone vd. 2001). Çalışmada 2/3 blok büyüklüğünde Hamming penceresi uygulanmıştır.

4.3 Deformasyon gridinin oluşturulması

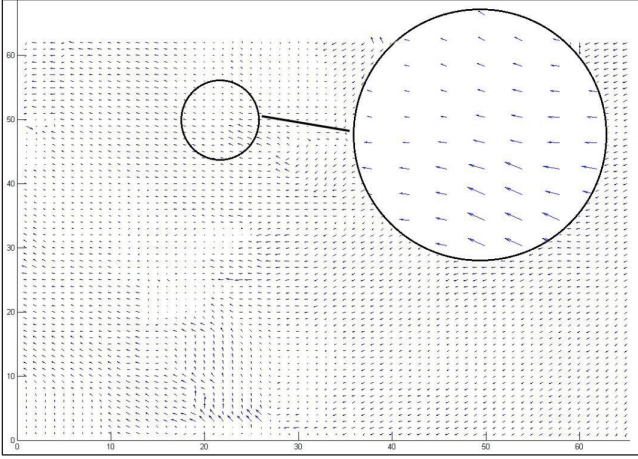
Öteleme indeksi x, y doğrultusunda hareket miktarı ve yönünü verir. En iyi eşleşme her bir piksel için hareket vektörü olarak kaydedilir. Hareket vektörlerinden oluşan bu matris geometrik dönüşümde kullanılacak olan deformasyon gridini oluşturur (Şekil 3). Çalışmada deformasyon gridi Hyperion çözünürlüğüne uygun olacak biçimde 30 m düzgün grid aralığına sahiptir.

4.4 Geometrik dönüşüm

Son aşama, orijinal IKONOS görüntüsünü dönüştürmek için deformasyon gridini kullanarak geometrik dönüşümü gerçekleştirmektir. Buna göre, 30 m grid aralığındaki hareket vektörleri IKONOS piksellerini (4 m) yeniden konumlandırmak üzere kullanılır. Her bir IKONOS pikseli için en



Şekil 2: Hedef bloğun referans görüntü pikseli üzerinde ötelenmesi



Şekil 3: 30 m aralıklı düzgün grid yapısında elde edilen yerel hareket miktarları

yakın dört hareket vektörü piksele mesafesi ile ters orantılı ağırlıklandırılır ve piksel için hareket miktarı yeniden hesaplanır. Bu şekilde 4 m'lik IKONOS örnekleme için uygun bir deformasyon gridi elde edilmiş olur. Pikseller yeniden konumlandırılırken yeni piksel değerleri daha gürültüsüz bir çıktı veren çift doğrusal ara değerlendirme ile hesaplanmıştır.

5. Deneysel sonuçlar

Parlaklık temelli imge çakıştırmada yaygın olarak kullanılan NCC, MI (MI ve NMI) ve PC elde edilen görüntü çakıştırma problemindeki performans ve başarımları açısından değerlendirilmiştir. Başarımlar ve performans değerlendirmesi elde edilen sonuçların 'Ters Tutarlılık' (Christensen vd. 2006) ve 'Global Benzerlik' açısından incelenmesi ile elde edilmiştir. Bu niceliksel başarımlar ölçütlerine ek olarak, prosedürlerin MATLAB' da aldığı işlem süresi de performans ölçütü olarak kullanılmıştır.

Ters tutarlılık sonuçları: Bu çalışmada ters tutarlılık ileri ve ters dönüşüm sonuçları arasındaki ortalama hata ve Ortalama Kareysel Hata Karekökü (Root Mean Squared Error - RMSE) olarak verilmiştir (Tablo 2). Ters tutarlılık değerlendirmesinden elde edilen hata istatistiklerine göre faz korelasyonu (PC) en düşük hata miktarı ile diğer benzerlik ölçütleri ile yapılan dönüşümlere göre tutarlılığı en yüksek sonucu vermiştir. NCC, PC den sonra gelmektedir. Ancak, NMI diğer ölçütlerden oldukça yüksek bir hata miktarlarıyla başarımları en düşük yöntem olmuştur.

Global benzerlik sonuçları: Çakıştırmada kullanılan benzerlik ölçütleri NCC, MI ve PC bu sefer geometrik olarak dönüştürülmüş IKONOS görüntüsü ile Hyperion görüntülerinin global benzerliğini hesaplayarak başarımların değerlendirilmesinde kullanılmıştır. Değerlendirmeler NCC ölçütü için 'r' korelasyon katsayısı, MI için entropi tabanlı bir ölçüt, PC için ise faz korelasyonu katsayısı cinsinden elde edilmiştir, sonuçlar Tablo 2'de verilmiştir. NCC için elde edilen 'r' 0-1 arasında değerler alır, her iki imge birbirinin aynısı ise $r=1$ 'dir. MI için verilen entropi ölçütü 0-2 arasında değerler alır, her iki imge birbirinin aynısı ise ölçüt 2 değerini alır. PC için elde edilen faz korelasyonu katsayısı 0-1 arasında değerler alır, her iki imge birbirinin aynısı ise katsayı 1'dir. Değerler R, G, B bantları için hesaplanan ölçütlerin toplamı olarak verilmiştir. Tablo 2'de yer alan NCC, NMI ve PC ölçütlerinin yüksek başarımlı çakıştırma için yüksek değerler alması beklenmektedir.

Global benzerlik değerlendirmesinden elde edilen değerlere göre, MI hedef ve referans görüntü arasındaki en düşük benzerlik değerleri ile en düşük başarımları göstermiştir. MI, literatürde de tespit edildiği üzere (Pluim vd. 2003; Suganya vd. 2010) NMI'ye göre daha kötü sonuçlar vermiştir. Bu nedenle MI sonuçları çalışmadan çıkartılmıştır. Fakat diğer yandan literatürde MI yöntemlerinin NCC'ye parlaklık farklarına karşın üstünlük sağladığı yönündeki tespitlere rağmen (Chen vd. 2003; Roshni ve Revathy 2008) bu çalışmada MI ve NMI, NCC'den daha kötü sonuçlar vermiştir. Faz korelasyonu ise bu tüm benzerlik ölçütlerine göre yine en yüksek başarımlı yöntem olarak tespit edilmiştir.

İşlem yükü iş istasyonunda tek bir öteleme sırasında yapılan işlemler için geçen süre cinsinden verilmiştir (Tablo 2). Buna göre, NCC en düşük işlem yüküne sahiptir. PC'nin işlem yükü NCC'ye göre bir miktar fazladır. NMI ise NCC'nin yaklaşık 5 katı işlem yüküne sahiptir.

6. Sonuç

Bu çalışmada, Hyperion ve IKONOS görüntülerinin parlaklık temelli çakıştırılmasında benzerlik ölçütü olarak Normalize Çapraz Korelasyon (NCC), Ortak Bilgi (MI) ve Faz Korelasyonu (PC) kullanarak, elde edilen sonuçları 'Ters Tutarlılık' ve 'Global Benzerlik' yöntemleri ile başarımlar açısından değerlendirdik.

Deneysel sonuçlar her ne kadar mutlak başarımları vermese de çakıştırma işleminin başarımları ile ilgili niceliksel değerler vermektedir. Ters Tutarlılık; geometrik benzerlik, Global Benzerlik; parlaklık benzerliği ile ilgili ölçütler verir. Global Benzerlik değerlendirmeleri dönüştürülmüş hedef ve referans imgenin parlaklık değerleri arasındaki benzerliğe dayanır. Bu nedenle, imgeler arasındaki parlaklık farkları yöntemin parlaklık farkı sorunuyla ne kadar baş edebildiğine göre yöntemlerin başarımlarını etkileyen bir faktördür. Sonuç itibarıyla, Global Benzerlik ölçütü parlaklık değerlerindeki olağan değişimlere karşı hassastır. Geometrik bir ölçüt niteliğinde olan tersi alın-

Tablo2: NCC, NMI ve PC yöntemleri için ters tutarlılık hata istatistikleri, global benzerlik ölçütleri ve işlem yükü

Benzerlik Ölçütleri	İleri-Ters dönüşüm farkı		Global Benzerlik			İşlem Süresi
	RMSE	Ortalama Hata	NCC	NMI	PC	Zaman (sn)
NCC	6.9590	3.2101	2.7218	3.7172	1.6319	*2.6
NMI	9.9147	3.9068	2.5056	3.1567	1.4397	13.9
PC (2/3 pencereleme)	*1.8002	*1.6721	*2.7908	*3.7183	*1.7030	3.46

(* Ters tutarlılık için en düşük hatayı, global benzerlik için en yüksek benzerliği ve işlem yükü için en kısa zamanı gösterir)

bilirlik (invertibility) özelliği ise parlaklık değişimlerine karşı gürbüzdür ve yöntemlerin geometrik dönüşümdeki başarımını gösterir. İşlem yükü verimlilik için önemli bir göstergedir, çünkü geometrik dönüşüm için çok fazla blok ötelemesi ve hesaplama gerektiğinden işlemler çok uzun zamanlar alabilmektedir.

Tüm deneysel sonuçlara genel olarak bakılacak olursa, PC diğer yöntemlere oranla elle tutulur ölçüde daha yüksek başarımları göstermiştir. PC'nin işlem yükü NCC'ye göre bir miktar daha fazladır, ancak sonuçlarda elde edilen iyileştirmeye bakıldığında bu durum tolere edilebilir. NCC'den elde edilen sonuçlar PC'ye göre bir miktar daha kötüdür. Ancak NMI en kötü sonuçları vermiştir, hatta MI daha da kötüdür. MI ve NMI için elde edilen başarımlar ve performans değerlendirme ölçütlerinin tümü bu yöntemlerin farklı alıcılardan elde edilmiş uydu görüntülerinin karşılaştırılmasında çok da uygun olmadığını göstermektedir.

Değerlendirmeler seçilecek benzerlik ölçütünün tespitiinde faydalı bilgiler sağlamıştır. Ancak, imge karşılaştırmanın değerlendirilmesinin çok kolay bir iş olmadığı bilinmelidir. Başarımları düşüren nedenler, imge karşılaştırma işleminin aşamalarından birinde sürece dahil olmuş olabileceği gibi, gerçekte imge içeriklerinde var olan doğal farklılıklar nedeniyle de ortaya çıkabilir.

Teşekkür

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından, 111E052 no'lu proje kapsamında desteklenmiştir.

Kaynaklar

- Baltsavias E., Gruen A., Eisenbeiss H., Zhang L., Waser L.T., (2008), *High-quality image matching and automated generation of 3D tree models*, International Journal of Remote Sensing, 29(5), 1243-1259.
- Brown L.G., (1992), *A survey of image registration techniques*, ACM Computing Surveys, 24(4), 325-376.
- Bunting P., Labrosse F., Lucas R., (2010), *A multi-resolution area-based technique for automatic multi-modal image registration*, Image and Vision Computing 28, 1203-1219.
- Chen H.M., Pramod K., Varshney P.K., Arora M.K., (2003), *Performance of Mutual Information Similarity Measure for Registration of Multitemporal Remote Sensing Images*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 41(11), 2445-2454.
- Christensen G.E., Geng X, Kuhl J.G., Bruss J., Grabowski T.J., Allen J.S, Pirwani I.A., Vannier M.W., Damasio H., (2006), *Introduction to the non-rigid image registration evaluation project (NIREP)*. Proceedings of the Third international conference on Biomedical Image Registration'ında, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, ss.128-135.
- Christensen G.E., Johnson H.J., (2001), *Consistent image registration*, IEEE Transactions on Medical Imaging, 20(7), 568-582.
- Dai X., Khorram S., (1998), *Effects of image misregistration on the accuracy of remotely sensed change detection*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 36(5), 1566-1577.
- Eismann M.T., Hardie R.C., (2008), *Hyperspectral Resolution Enhancement Using High-Resolution Multispectral Imagery With Arbitrary Response Functions*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 43(3), 455-465.
- Fookes C., Bennamoun M., (2002), *The Use of Mutual Information for Rigid Medical Image Registration: A Review*, 2002 IEEE Conference on Systems, Man and Cybernetics, Cilt.4, October 6-9, 2002, Hammamet - Tunisia.

- Geary R.C., (1954), *The Contiguity Ratio and Statistical Mapping*, The Incorporated Statistician, 5(3),115-145.
- Griffith D.A., (2003), *Spatial Autocorrelation and Spatial Filtering*, Springer Berlin, Germany.
- Gruen A., (2012), *Development and status of Image matching in Photogrammetry*, The Photogrammetric Record, 27(137), 36-57.
- Inglada J., Giros A., (2004), *On the Possibility of Automatic Multisensor Image Registration*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 42(10), 2104-2120.
- Keller Y., Averbuch A., (2007), *A projection-based extension to phase correlation image alignment*, Signal Processing, 87(1), 124-133.
- Ling, Y., Ehlers, M., Usery, E.L., Madden, M., (2008), *Effects of spatial resolution ratio in image fusion*, International Journal of Remote Sensing, 29(7), 2157-2167.
- Mitianoudis N., Stathaki T., (2007), *Pixel-based and region-based image fusion schemes using ICA bases*, Information Fusion, 8, 131-142.
- Pluim J.P.W., Maintz J.B.A., Viergever M.A., (2003), *Mutual-Information-Based Registration of Medical Images: A Review*, IEEE Transaction on Medical Imaging, 22, 986-1004.
- Roshni V.S., Revathy DR. K., (2008), *Using mutual information and cross correlation as metrics for registration of images*, Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 4(6), 474-481.
- Suganya R., Priyadharsini K., Rajaram Dr. S., (2010), *Intensity Based Image Registration by Maximization of Mutual Information*, International Journal of Computer Applications, 1(20), 1-5.
- Stone H.S., Orchard M.T., Chang E.-C., Martucci S.A., (2001), *A fast direct Fourier-based algorithm for subpixel registration of image*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39(10), 2235-2243.
- Thomas C., T. Ranchin T., Wald L., Chanussot L., (2008), *Synthesis of Multispectral Images to High Spatial Resolution A Critical Review of Fusion Methods Based on Remote Sensing Physics*, IEEE Transactions in Geoscienceand Remote Sensing, 46(5), 1301-1312.
- Url-1, Hyperion Sensor, USGS EO-1 Website, <http://eo1.usgs.gov/>, [Erişim; Kasım 2012].
- Url-2, CHRIS Proba Sensor, Proba – Earthnet Online website, <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-commissions/proba>, [Erişim; Kasım 2012].
- Url-3: GeoEye Satellites, <http://www.geoeye.com/CorpSite/products/earth-imagery/geoeye-satellites.aspx>, [Erişim; Kasım 2012].
- Wyawahare M.V., Pradeep D., Patil M., Abhyankar H.K., (2009), *Image Registration Techniques: An overview*, International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition, 2(3), 11-28.
- Yan H., Li J.G., (2008), *Robust Phase Correlation based feature matching for image co-registration and DEM generation*, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. XXXVII, Part B7, 1751-1756.
- Yokoya N., Yairi T., Iwasaki A., (2012), *Coupled Nonnegative Matrix Factorization Unmixing for Hyperspectral and Multispectral Data Fusion*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 50(2), 528-537.
- Zitova B., Flusser J., (2003), *Image registration methods: a survey*, Image and Vision Computing, 21, 977-1000.
- Zhukov B., Oertel D., Lanzl F., Reinhackel G., (1999), *Unmixing-Based Multisensor Multiresolution Image Fusion*, IEEE Transactions in Geoscience and Remote Sensing, 37(3), 1212-1226.