

STEREO HAVA FOTOĞRAFLARINDAN DOĞRUSAL ÇİZGİLERİN OTOMATİK EŞLENMESİ VE GERİ-ÇATIMI İÇİN ÇİFT-TABANLI YENİ BİR YAKLAŞIM

A. Ö. Ok ^a*, J. D. Wegner ^b, C. Heipke ^b, F. Rottensteiner ^b, U. Sörgel ^b, V. Toprak ^a

^a Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Jeodezi ve Coğrafi Bilgi Teknolojileri, 06531, Ankara, Türkiye
- (oozgun, toprak)@metu.edu.tr

^b Hannover Üniversitesi, Fotogrametri ve Jeoinformasyon Enstitüsü, 30167, Hannover, Almanya
- (wegner, heipke, rottensteiner, soergel)@ipi.uni-hannover.de

Komisyon III, WG III/4

ANAHTAR SÖZCÜKLER: Stereo Hava Fotoğrafları, Görüntü Eşleme, Doğrusal Çizgiler, Üç Boyutlu Geri-Çatım

ÖZET:

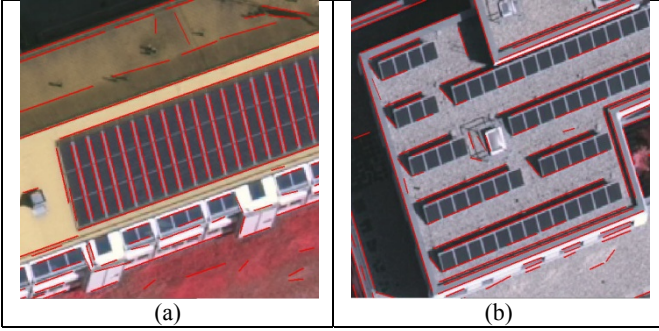
Bu çalışmada, stereo hava fotoğraflarından elde edilen iki boyutlu çizgilerin otomatik olarak eşlenmesi ve geri-çatımı amacıyla kullanılabilir yeni bir yaklaşım geliştirilmiştir. Stereo görüntülerden elde edilen çizgiler öncelikle çift-tabanlı olarak eşleştirilmiştir. Çift-tabanlı eşlemenin bir sonucu olarak meydana gelen çoklu-eşleme hatalarının büyük bir kısmı yeni geliştirilen yinelemeli bir son-işleme yöntemi ile başarılı bir şekilde temizlenmiştir. Geliştirilen yaklaşımın performansı Almanya'dan seçilen dört farklı test alanında değerlendirilmiş, tüm test alanları için %98 ve üzeri doğru eşleme seviyelerine ulaşılmıştır. Test alanlarından elde edilen performans değerleri incelendiğinde, geliştirilen yaklaşımın otomatik görüntü eşleme açısından oldukça başarılı ve sağlam olduğu anlaşılmaktadır.

1. GİRİŞ

Stereo hava fotoğraflarından elde edilen doğrusal çizgilerin otomatik eşleme yöntemleri kullanılarak eşleştirilmesi sonucu üretilebilecek detaylar 3-boyutlu nesne çıkarımı, havai nirengi işleminin yapılması ve/veya iyileştirilmesi, görüntü çakıştırma gibi çok farklı amaçlara hizmet edebilmektedir. Ancak ultra yüksek çözünürlüklü (6–8 cm) hava fotoğraflarından doğrusal çizgilerin otomatik olarak eşlenmesi; stereo görüntülerdeki farklı perspektif geometrileri, elde edilen doğrusal çizgilerin uç noktalarının çakışmaması, uygulanabilecek geometrik koşulların güvenilir olmaması, çizgilerin tampon bölgelerinde bulunan radyometrik değerlerin benzerliği, tekrarlanan örüntü ve desenler vb. çok farklı nedenlerden dolayı oldukça zor bir problemdir. Bugüne kadar yapılan çalışmalar incelendiğinde stereo görüntülerde doğrusal çizgilerin otomatik olarak eşlenmesi probleminin henüz çözülmediği ve sadece belirli özellikteki görüntülerle sınırlı kaldığı sonucu ortaya çıkmaktadır (Ok vd., 2010). Bunun temel nedeni ise farklı çekim geometrilerinde elde edilmiş çizgilerin eşlenmesi sırasında uygulanabilecek olan koşul ve/veya ölçütlerin oldukça sınırlı sayıda olmasıdır. Örneğin, Zhang (2005) doğrusal kenarlara ait temel geometrik koşulları incelemiş ve bu koşulların perspektif geometri ve görüntü çekim anında oluşan etkenlerden dolayı güvenilir olmadığını belirtmiştir. Doğrusal kenarların her iki yanında tanımlanan tampon bölgeler içine düşen radyometrik bilgilerden üretilebilecek çeşitli koşullarda detaylı olarak incelenmiştir. Örneğin, Schmid ve Zisserman (1997) tampon bölgeler içine düşen radyometrik değerlerin her iki görüntüdeki korelasyonunu incelemiş, kısa ve uzun bindirmeli görüntüler için farklı hesaplama yöntemleri geliştirmiştir. Tampon bölgelere ait çeşitli renk ve kroma bilgileri de çalışmalarda sıkça yer almış ve detaylı olarak incelenmiştir (Scholze vd., 2000; Zhang ve Baltsavias, 2000, Herbert vd., 2005). Bir başka çalışmada, Wang vd. (2009) çizgilerin her iki yanında bulunan tampon bölgelerdeki gradyan yönelimini dikkate alan yeni bir yöntem geliştirmiş ve doğrusal çizgilerin yakın-çekim görüntülerinde eşlenmesi ile ilgili başarılı sayılabilecek sonuçlar elde etmiştir. Fakat günümüze kadar geliştirilen tüm koşullar incelendiğinde, tanımlanan koşulların hiçbirinin hava

fotoğraflarında karşılaşılan “tekrarlanan örüntü ve desenler” problemini, tampon bölgelerden elde edilen bilgilerin çok benzer karakteristiğe sahip olmasından dolayı çözemediği anlaşılmaktadır (Şekil 1). Bu nedenle, örneğin, Schmid ve Zisserman (1997)'in çalışmasının güvenilirliği ve sağlamlığı, eşleme işlemi sonunda ortaya çıkan çoklu-eşleme problemini çözmek için uyguladıkları epipolar sıralama koşulundan gelmektedir. Fakat bu koşul her ne kadar problemi çözer gibi gözükse de, doğası gereği iki farklı problemi yaratmaktadır; (i) özellikle bina gibi nesnelere ait nispeten ince sayılabilecek doğrusal detayların eşlenmesini imkânsız hale getirmekte ve (ii) görülemeyen alanlarda oluşması muhtemel eşleme hatalarına karşı bir çözüm üretmemektedir. Sonuç olarak, bugüne kadar gerçekleştirilen çalışmaların neredeyse tamamında stereo görüntülerde bire-bir çizgi eşleme için geliştirilmiş çeşitli ölçüt ve koşullar kullanılmış, çizgilerin birbirleriyle olan ilişkileri dikkate alınmamıştır. Ancak, eşleme işlemi sırasında bu ilişkilerin dikkate alınması çok çeşitli yeni koşulların tanımlanmasına izin vermekte ve gerçekleştirilen eşleme işleminin kalitesini ve performansını arttırmaktadır.

Bu çalışmada, stereo hava fotoğraflarından elde edilen iki boyutlu çizgilerin otomatik olarak eşlenmesi ve geri-çatımı amacıyla kullanılabilir yeni bir yaklaşım geliştirilmiştir. Stereo görüntülerden elde edilen çizgiler öncelikle çift-tabanlı olarak eşleştirilmiştir (Ok vd., 2010). Fakat çift-tabanlı eşleme yöntemi, kullanılan hava fotoğraflarının ultra yüksek çözünürlüklü doğası gereği her iki görüntüde de oluşabilecek bire-bir eşleme problemlerini tam olarak çözememektedir. Bu nedenle bu çalışmada, oluşması muhtemel çoklu-eşleme problemlerinin çözülmesinde etkili olarak kullanılabilir yeni bir yinelemeli son-işleme yöntemi geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntem üç yeni ölçüt (Daisy, Mükerrer Eşleme ve Çift-Tabanlı Benzerlik) kullanmakta ve çoklu-eşleme problemlerinin çözümünde bu ölçütleri yinelemeli olasılık yöntemiyle bütünleştirmektedir. Yöntem sonucunda stereo görüntü çiftlerinde bire-bir eşlemeleri yapılan doğrusal çizgilerin üç boyutlu geri-çatımı fotogrametrik uzaysal düzlem kesişimi yöntemiyle gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Tekrarlanan örüntü ve desenler

2. YÖNTEM

2.1 Doğrusal Kenar Tespiti ve Çift-Tabanlı Eşleme

Bu çalışmada, doğrusal çizgilerin çift-tabanlı olarak eşlenmesi için yeni bir yöntem kullanılmıştır (Ok vd., 2010). Burada, yöntemin ana kısımlarından kısaca bahsedilmiş, detaylarına ise girilmemiştir. Kısaca yöntem iki temel adımdan oluşmaktadır; (i) doğrusal kenar tespiti, (ii) elde edilen kenarların stereo görüntülerde çift-tabanlı olarak eşlenmesi. İlk aşamada stereo hava fotoğrafları bağımsız olarak ele alınmış ve görüntü işleme yöntemleri kullanılarak iki boyutlu doğrusal kenarlar çıkartılmıştır. Bu işlem sırasında literatürde var olan çalışmalardan farklı olarak hava fotoğraflarının doğasında bulunan çok-bant bilgisi her aşamada (ön-işleme, kenar bulma vb.) efektif olarak kullanılmış ve iki boyutlu kenarlar güncel bir doğrusal nesne çıkarıcı olan temel bileşenler analizi ile üretilmiştir. İkinci aşamada, stereo görüntülerden elde edilen doğrusal çizgiler, yeni bir çift-tabanlı (pair-wise) ilişkiyel yöntem geliştirilerek eşleştirilmiştir. Sonuçta, stereo görüntülerdeki çift-tabanlı eşlemeler bir epipolar, üç geometrik, iki fotometrik, bir korelasyon ve bir spatiogram olmak üzere toplam 8 adet koşulun ağırlıklı benzerlik kriterine göre değerlendirilmesi sonucunda belirlenmiştir. Bütün koşullar ayrı ayrı 0 ile 1 değer aralığına normalize edilmiş ve değerlendirme sırasında ağırlıklar eşit olarak dağıtılmıştır. Bu değerlendirme sonucunda ilk görüntüden oluşturulan her bir çizgi çifti için en benzer çiftler diğer görüntüde belirlenmiştir.

Çift-tabanlı eşlemenin bir sonucu olarak aynı çizgi üzerinde birden fazla eşleme gerçekleşebilmektedir. Yapılan inceleme ve analizler sonucunda, çift-tabanlı eşleme sonucunda meydana gelen çoklu-eşlemelerin genellikle birbirine çok yakın olarak çıkarılan ve hemen hemen aynı yönelime sahip olarak bulunan çizgiler üzerinde yoğunlaştığı anlaşılmıştır. Bu da yine, Şekil 1'de örnekleri verilen problemle (tekrarlanan örüntü ve desenler) doğrudan ilgili olup, iki temel nedenden dolayı oluşmaktadır; (i) birbirine çok yakın konumlanmış ve aynı nesneye (bina, yol vb.) ait olan çizgilerin çok benzer çift-tabanlı karakteristikleri bulunmakta, ve (ii) çift-tabanlı eşleme sırasında kullanılan koşulların testi sırasında kullanılan esnek eşik değerleri sonucu, birbirine çok yakın bulunan çizgiler bu eşik değerlerini kolaylıkla sağlayabilmektedirler. Bu nedenle, bu çalışmada, oluşan bu sorunları çözmek amacıyla yeni bir yinelemeli son-işleme yöntemi geliştirilmiştir. Yöntem, en benzer çizgilerin bulunması aşamasında geliştirilen üç yeni ölçütü kullanılmaktadır. (i) Birinci ölçüt, Tola vd. (2010) tarafından alan-tabanlı görüntü eşleme amacıyla geliştirilmiş olan Daisy ölçütünü temel almakta ve bu ölçütü çizgilerin tampon bölgelerindeki gradyan yönelimlerinin hesaplanması için kullanılmaktadır. Orijinal Daisy ölçütü nokta bazlı olduğundan, bu çalışmada ölçüt, doğrusal nesnelerin tampon bölgelerinde gradyan yönelimini hesaplamaya uygun hale

getirilmiştir. (ii) İkinci ölçüt olan Mükerrer Eşleme ise tüm çift-tabanlı eşlemelerden hesaplanmakta olup bir çizginin birden fazla çizgi çiftinde yer alması sonucu ortaya çıkmaktadır. Bir başka ifadeyle, ilk görüntüden çizgi çiftlerinin oluşturulması sırasında bir çizgi birden fazla referans çizgi çiftinde yer almakta ve dolayısıyla eşleme sonucunda her çizgi için birden fazla mükerrer eşleme bilgisine ulaşılabilmektedir. Bu bilgi ise, hatalı eşlemelerin ayıklanması sırasında etkili bir şekilde kullanılabilir. (iii) Üçüncü ölçüt ise çift-tabanlı eşlemeler için kullanılan koşulların tamamından üretilmiştir. Çift-tabanlı eşleme sırasında kullanılan bütün koşullar ayrı ayrı 0 ile 1 değer aralığına normalize edildiğinden, her bir çift-tabanlı eşlemede yer alan çizgiler sonuçta bir çift-tabanlı benzerlik değeri almakta ve bu bilgi hatalı eşlemelerin ayıklanması sırasında kullanılabilir. Bu üç ölçüt, geliştirilen yinelemeli son-işleme yönteminde bütünleştirilmiş, bire-bir çizgi eşlemeleri en yakın/yakın oranlarının incelenmesi ve bu üç ölçütü barındıran son-benzerlik değerlendirilmesi sonucunda belirlenmiştir.

2.2 Geliştirilen Ölçütler

2.2.1 Daisy Ölçütü

Son yıllarda yapılan çalışmalarda, görüntüden elde edilen gradyan yönelim histogramlarının görüntü eşleme sırasında oluşan hatalara (belirli düzeye kadar) karşı çapraz-korelasyon ve piksel-farkı gibi klasik yöntemlere göre daha sağlam ve güvenilir oldukları bildirilmiştir (Lowe, 2004; Mikolajczyk ve Schmid, 2005; Bay vd., 2006). Alan-tabanlı eşleme sırasında kullanılan gradyan yönelim histogramlarının daha hızlı ve etkili bir şekilde hesaplanmasını sağlayan Daisy ölçütü ise Tola vd. (2010) tarafından geliştirilmiştir. Çizgi-tabanlı eşleme literatüründe ise, gradyan yönelimlerini eşleme amacıyla kullanan sadece bir çalışma bulunmaktadır (Wang vd., 2009). Giriş bölümünde de açıkça belirttiğimiz üzere, sadece çizgilerin tampon bölgelerindeki bilgilere bağlı kalarak yapılan eşlemeler stereo hava fotoğraflarında ciddi eşleme problemleri yaratmaktadır. Fakat bu bilgiler, kesinlikle hatalı olan eşlemelerin tanımlanması ve ayıklanması sırasında yeni olanaklar sağlamaktadır.

Bu çalışmada, son-işleme sırasında çizgilerin kenarlarında oluşturulan tampon bölgelerin değerlendirilmesi amacıyla Daisy ölçütü kullanılmıştır. Daisy ölçütünün, (i) gradyan yönelim histogramlarının hesaplanması işleminde sağladığı hız ve (ii) dairesel, simetrik şekli ve yön-bağımsız kernel yapısı sayesinde farklı yönelime sahip çizgiler için kolaylıkla uygulanabilmesi olmak üzere diğer gradyan tabanlı ölçütlere göre iki temel üstünlüğü bulunmaktadır. Bu çalışmada, çizgilerin kenarlarında oluşturulan tampon bölgelerdeki gradyan yönelimlerin efektif bir şekilde incelenmesi amacıyla sadece Daisy ölçütüne getirilen yenilikler açıklanmış, orijinal Daisy ölçütü ise açıklanmamıştır. Piksel tabanlı orijinal Daisy ölçütüne ile ilişkin detaylar ilgili referanstan incelenebilir (Tola vd., 2010).

İlk olarak, Daisy nokta kümesinin merkez noktası her iki görüntüden elde edilen çizgilerin bire-bir hizalanması sonucu elde edilen ortak çizgi kısımlarının (Ok vd., 2010) merkezine oturtulmuştur. Devamında, her çizginin yönü temel alınarak nokta kümesi merkez noktası etrafında döndürülmüş ve gradyan vektörleri üzerinde her çizgi çifti için değişmezlik elde edilmiştir. Farklı bakış açılarının çizgiler üzerinde oluşturduğu perspektif hataların dikkate alınması amacıyla orijinal Daisy ölçütünde kullanılan sabit yarıçap (R) yerine her çizgi çifti için değişken yarıçap değerleri (R_i) kullanmış böylece her çizgi çiftinde çizgilerin tam üzerine düşen noktalar için tam perspektif değişmezlik elde edilmiştir. Fakat çizgilerin her iki

yanında bulunan bölgelere ait olan yüzeyler hakkında bu aşamada bir bilgi bulunmadığı için değişken yarıçap değerleri o kısımlar için de aynı tutulmuş ve değiştirilmeden kullanılmıştır. Bu değişikliklerden sonra, gradyan yönelim benzerliklerin hesaplanması sırasında Daisy nokta kümesi çizgilerin üst ve alt kısmı olmak üzere iki gruba ayrılmış ve bu kısımlar için iki adet sabit ikili maskeler $\{M_m(x)\}$ üretilmiştir. Bu sayede, çizgilerin her iki yanı için ayrı ayrı benzerlik testlerinin yapılabilmesi sağlanmıştır. Pöksel-tabanlı benzerliklerin hesaplanması sırasında Tola vd. (2010) öklid farkına dayanan bir metrik önermiştir:

$$D = \frac{1}{\sum_{q=1}^S M^{[q]}} \sum_{k=1}^S M^{[k]} \left\| D_i^{[k]}(x) - D_j^{[k]}(x) \right\|_2, \quad (1)$$

Yukarıdaki eşitlikte S toplam nokta sayısını, $M^{[k]}$ ikili maskenin k 'inci elemanını, $D_i^{[k]}$ ise i görüntüsü için hesaplanan $D(x)$ içindeki h histogramının k 'inci elemanını tanımlamaktadır. Bu metrik, birçok durum için başarılı sonuçlar verse de, D_i ve D_j arasındaki çapraz-korelasyonu dikkate almamaktadır. Bu nedenle bu çalışmada, çapraz-korelasyonla ortak çalışabilecek yeni bir metrik (M_S) tanımlanmıştır:

$$M_S = \frac{1}{1 + \left(\sum_{k=1}^S M^{[k]} \left\| D_i^{[k]}(x) - D_j^{[k]}(x) \right\|_2 \right)^2} \quad (2)$$

Yukarıdaki eşitlikte, (1) nolu eşitlikten farklı olarak ikili maskelere ait nokta sayılarının her durumda aynı olmasından dolayı normalizasyon katsayısı çıkarılmıştır. Sonuç olarak üretilen tüm M_S değerleri 0 ile 1 arasında değerler almakta ve benzerlik hesaplanmasında daha seçici davranmak amacıyla paydadaki sonuç değerinin karesi alınmaktadır. (2) nolu eşitliğin yanı sıra çapraz-korelasyon ise

$$C_S = \left(\frac{\sum_{k=1}^S (M^{[k]} D_i^{[k]}(x) - \mu_{(MD_i)}) (M^{[k]} D_j^{[k]}(x) - \mu_{(MD_j)})}{s(MD_i) s(MD_j)} \right)^2 \quad (3)$$

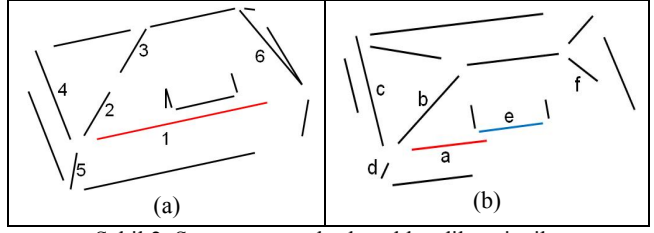
şeklinde tanımlanmıştır. Eşitlikte yer alan $\mu_{()}$ ve $s()$ ise sırasıyla ortalama ve standart sapma operatörlerini tanımlamaktadır. Yine (3) nolu eşitlikte, bir önceki eşitlikte de olduğu üzere hesaplanan değerlerin karesi alınmış, böylece yüksek benzerliğe sahip değerlerin ağırlığı artırılmıştır. Son olarak, (2) ve (3) nolu eşitliklerde hesaplanan değerler, her bir çizgi çifti için alt ve üst olmak üzere ayrı ayrı olarak hesaplandığı için, çizgi eşleme işlemi sırasında kullanılacak olan yeni Daisy ölçütü (Sim_D):

$$Sim_D = \left((M_S^{Ust}, M_S^{Alt})^+, (C_S^{Ust}, C_S^{Alt})^+ \right)^- \quad (4)$$

şeklinde tanımlanmıştır. Eşitlikte $()^+$ ve $()^-$ sırasıyla $max(a, b)$ ve $min(a, b)$ operatörlerini tanımlamaktadır.

2.2.2 Mükerrer Eşleme Ölçütü

Bu çalışmada, çoklu-eşleme hatalarından kaynaklanan problemleri çözmeye kullanılabilecek yeni bir ölçüt geliştirilmiştir. Bu ölçüt tüm çift-tabanlı eşlemelerden hesaplanmakta olup bir çizginin birden fazla referans çizgi çiftinde yer alması sonucu ortaya çıkan mükerrer eşleme bilgisine dayanmaktadır. Geliştirilen ölçütün ana fikri Şekil 2'de verilmiştir. Şekilde stereo görüntüden çıkarılmış iki-boyutlu çizgiler gösterilmiş ve bu iki görüntü için sadece #1 nolu çizgiyi içeren eşleme sonuçları Çizelge 1'de verilmiştir. Çizelge 1a ilk kolonda sol görüntüde oluşturulan çizgi çiftleri, ikinci kolonda



Şekil 2. Stereo görüntülerden elde edilen çizgiler.

Çift-tabanlı Eşleme		Çizgi Eşleme	
Sol	Sağ	Sol	Sağ
1 - 2	a - b	1	a - e
1 - 3	a - b	2 - 3	b
1 - 4	a - c	4	c
1 - 5	e - d	5	d
1 - 6	a - f	6	f

Çizelge 1. (a) Çift-tabanlı eşleme sonuçları ve (b) bu sonuçlardan üretilen çizgi eşleme çizelgesi.

ise bu oluşturulan çizgi çiftleri için çift-tabanlı eşleme sonucunda sağ görüntüde seçilen en benzer çizgi çiftleri verilmiştir. Çizelge 1b ise çift-tabanlı eşlemelerden yola çıkarak elde edilen bire-bir çizgi eşlemelerini belirtmektedir.

Çizelge 1a detaylı olarak incelendiğinde #1 nolu çizgi toplam 5 farklı referans çizgi çiftinde yer almıştır. Yine Çizelge 1b'den anlaşıldığı üzere, #1 nolu çizgi için çift-tabanlı eşleme sonucunda iki farklı (#a ve #e) çizginin eşlendiği görülmektedir. Ancak Şekil 2'den kolaylıkla görülebileceği üzere sol görüntüde bulunan #1 nolu çizgi sağ görüntüde yalnız #a nolu çizgi ile doğru olarak eşleşmektedir ve diğer eşleme (#e) hatalıdır. Burada oluşan eşleme problemini çözmek için Çizelge 1a'da #1 nolu çizgi için oluşan mükerrer eşleme bilgisi efektif bir şekilde kullanılabilir. Bir başka ifadeyle, #1 nolu çizgi için Çizelge 1b'de verilen her iki eşleme için (#a ve #e) çift-tabanlı eşleme sayıları Çizelge 1a'dan hesaplanmaktadır. Sonuçta, doğru eşleme için (#a) fazla sayıda tekrarlı eşleme gerçekleştirilmekte (toplam 4 adet), buna karşın hatalı eşleme (1 adet) ise daha az sayıda tekrar etmektedir. Böylece sayı bakımından mükerrer doğru eşleme sayısı mükerrer hatalı eşleme sayısını geçmekte ve hatalı eşleme veya eşlemeler ortaya çıkarılmaktadır. Fakat stereo görüntülerdeki farklı bakış açıları ve çift-tabanlı eşleme sırasında tanımlanan esnek eşik değerleri sonucu elde edilen eşlemelerde, nadiren de olsa hatalı eşlemelerin sayısı doğru eşlemelere eşit veya fazla olabilmektedir. Dolayısıyla tekrarlanan eşlemelerin yalnızca toplam sayısı temel alındığında eşleme sonucu hatalı olabilmektedir. Bu durumun önüne geçebilmek için eşlemelere her çizgi çifti arasında hesaplanan ve görüntü düzleminde minimum mesafeyi dikkate alan ağırlıklar atanmıştır. Sonuçta çizgi eşleme işlemi sırasında kullanılacak olan yeni mükerrer eşleme ölçütü (Sim_R):

$$Sim_R = \sum_{q=1}^N \frac{1}{\sqrt{(d_{ij}^{[L]}, d_{ij}^{[R]})}} \quad (5)$$

$d_{ij}^{[L]} \neq 0$ and $d_{ij}^{[R]} \neq 0$ şartları geçerli olmak üzere, tanımlanmıştır. Eşitlikte, N her çizgi için bulunan mükerrer eşleme sayısını, d_{ij} her bir çizgi çiftinde bulunan çizgilerin (l_i ve l_j) arasında hesaplanan piksel-tabanlı minimum mesafeyi, L ve R ise sırasıyla sol ve sağ görüntüyü belirtmektedir.

2.2.3 Çift-Tabanlı Benzerlik Ölçütü

Stereo görüntülerdeki çift-tabanlı eşlemeler bir epipolar, üç geometrik, iki fotometrik, bir korelasyon ve bir spatiogram olmak üzere toplam 8 adet koşulun ağırlıklı benzerlik kriterine göre değerlendirilmesi sonucunda belirlenmiştir (Ok vd., 2010). Bütün koşullar ayrı ayrı olarak 0 ile 1 değer aralığına normalize edilmiş ve her eşleme için hesaplanan toplam benzerlik (Θ_T) tüm koşulların ortalaması olarak alınmıştır. Her çift-tabanlı eşleme için hesaplanan bu toplam benzerlik değeri (Θ_T) ise sonuç olarak her eşlemenin performansı hakkında da bir ipucu vermektedir. Dolayısıyla, bir çizgi birden fazla çift-tabanlı eşlemede yer almış ise, her çizgi için Çift-Tabanlı Benzerlik Ölçütü (Sim_Q),

$$Sim_Q = \frac{1}{N} \sum_{q=1}^N \Theta_T^{[q]} \quad (6)$$

şeklinde hesaplanabilir. (6) nolu eşitlikte $\Theta_T^{[q]}$, q ile belirlenen çift-tabanlı ilişkiadaki toplam benzerliği belirtmektedir.

2.3 Geliştirilen Son-İşleme Yöntemi

Bu çalışmada, çift-tabanlı eşleme sonucunda oluşması muhtemel çoklu-eşleme problemlerin çözülmesinde etkili olarak kullanılabilecek yeni bir yinelemeli son-işleme yöntemi geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntem bölüm 2.2'de detayları verilen üç yeni ölçütü kullanmakta ve çoklu-eşleme problemlerinin çözümünde bu ölçütleri yinelemeli olasılık yöntemiyle bütünleştirmektedir.

Son-işleme aşamasının ilk kısmında Daisy (Sim_D) ve Mükerrer Eşleme (Sim_R) ölçütleri beraber kullanılarak çift-tabanlı eşlemeler sonucunda elde edilen eşlemeler arasında hatalı olan eşlemeler temizlenmeye çalışılmıştır. Bu aşamada bu ölçütler üzerine herhangi bir sabit eşik değeri tanımlamak yerine, ilk olarak Lowe (2004) tarafından önerilen bir metod olan en yakın/yakın benzerlik oranları (NNDR) üzerinden bir eşik değeri belirlenmiştir. Böylece, kullanıcı tarafından devamlı değiştirilmesi gereken bir eşik değeri tanımlamak yerine, çizgi eşleme probleminde farklı veri setleri üzerinde de rahatlıkla kullanılabilecek eşik değerleri belirlenmiştir. Çok sayıda veri setleri analizi sonucunda NNDR eşik değerleri, Daisy ölçütü için $ratio_D = 0.1$ ve Mükerrer Eşleme ölçütü için $ratio_R = 0.35$ seçilmiş ve bu oranların altında kalan eşlemelerin kesinlikle hatalı olduğu anlaşıldığından baştan elenmiştir. Fakat eşlemeler çift-tabanlı olarak gerçekleştirildiğinden herhangi bir çift içindeki sadece bir eşleme hatalı olabilmekte ve elenebilmektedir. Bu durumda, çift içindeki diğer eşleme otomatik olarak hatalı kabul edilmiş, sadece o çizgiye ait Mükerrer Eşleme (Sim_R) ve Çift-Tabanlı Benzerlik (Sim_Q) ölçütleri güncellenmiştir.

Bu aşamadan sonra, çoklu-eşleme barındıran çizgilerin doğru eşlemelerine karar vermek amacıyla yinelemeli bir son-benzerlik değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu aşamada, bir çizgi için tüm aday çizgiler seçilmiş ve son-benzerlik değerlendirilmesi Daisy (Sim_D), Mükerrer Eşleme (Sim_R) ve Çift-Tabanlı Benzerlik (Sim_Q) ölçütlerinin ağırlıklı lineer kombinasyonu alınarak yapılmıştır:

$$Sim_T = w_D \cdot Sim_D + w_R \cdot \frac{Sim_R}{(Sim_R)^+} + w_Q \cdot Sim_Q \quad (7)$$

Analizler sonucunda, Mükerrer Eşleme (Sim_R) ölçütünün kullanılan üç ölçüt arasında en güvenilir ve sağlam ölçüt olduğu

anlaşıldığından, eşitlikte ölçütler için kullanılan ağırlıklar $\{w_D, w_R, w_Q\} = \{1/4, 1/2, 1/4\}$ şeklinde tanımlanmıştır.

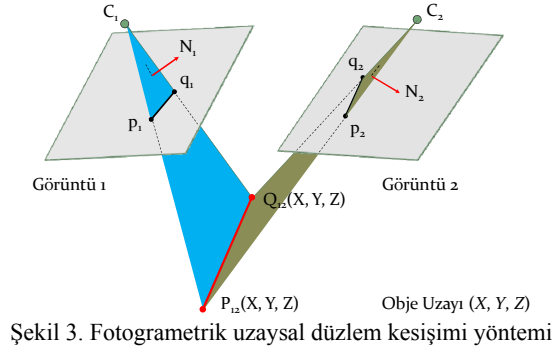
(7) nolu eşitlikten de kolayca anlaşılacağı üzere, tüm aday çizgiler arasından doğru eşleme olarak seçilecek çizgi, Toplam Benzerlik Ölçütünde (Sim_T) en yüksek değeri veren olacaktır. Fakat bu sırada, seçilen doğru eşlemeyle çelişen diğer çizgiler direkt olarak hatalı olarak etiketlenmemiş, hatalı olan eşlemelere karar verilmesinden önce doğrusalık testi uygulanmıştır. Bu testin uygulanma sebebi ise, herhangi bir çizgi diğer görüntüde birden fazla çizgi ile doğru olarak eşleşebilmektedir (Şekil 2'de verilen çizgiler "2-3" ve "b") ve bu durumda meydana gelen çoklu-eşlemelerden birden fazlası doğru olmaktadır. Dolayısıyla, doğru eşleme ile aynı doğrultuda bulunan çizgilerde doğru olarak kabul edilmelidir. Sonuç olarak, sadece farklı doğrultuda olan çizgiler hatalı olarak etiketlenmiş ve bir önceki aşamada olduğu gibi yine çift-tabanlı eşleme bilgileri güncellenerek silinmiştir. Bu sayede her yineleme sonucunda hatalı olarak etiketlenen çizgilere ait bilgiler Mükerrer Eşleme (Sim_R) ve Çift-Tabanlı Benzerlik (Sim_Q) ölçütlerinden silinmiş ve bu sayede bir sonraki yinelemede kullanılan Sim_R ve Sim_Q değerleri daha güvenilir hale gelmiştir.

Son-işleme sırasındaki yineleme döngüsü, tüm çift-tabanlı eşlemelerdeki çoklu-eşlemelerden kaynaklanan belirsizlikler ortadan kalkıncaya kadar devam etmektedir. Fakat günümüze kadar geliştirilen tüm yöntemlerde olduğu gibi, eğer bir görüntüde bulunan bir çizginin herhangi bir sebepten dolayı (görülemeden alanlar, kenar bulma vb.) diğer görüntüde gerçek eşleniği yoksa ve bu çizgi çift-tabanlı eşleme sırasında hatalı olarak bir başka çizgiyle eşlenmişse, bu eşleme sistem tarafından hatalı olarak tanımlanamamaktadır. Bu problemi çözmek için literatürdeki yöntemler kullandıkları ölçüte global eşik değeri koymaktadırlar. Bu çalışmada, geliştirilen ölçütler üzerine tanımlanabilecek yeni bir iki aşamalı eşikleme metodu geliştirilmiştir. Son-işleme sırasında her döngü sonucunda Mükerrer Eşleme (Sim_R) değerleri güncellendiğinden, tüm yineleme döngüsü tamamlandığında tüm eşlemeler için elde edilen Sim_R değerleri oldukça güvenilir olmaktadır. Bu da yukarıda açıklanan problemin çözülmesinde oldukça kolaylık sağlamakta ve yeni bir bakış açısı getirmektedir. Son işleme sonucunda geriye kalan hatalı eşlemeler doğru eşlemelere oranla çok daha az sayıda yer aldıklarından, hatalı eşlemeler için elde edilen Sim_R değerleri doğru olan eşlemelere oranla düşük seviyede kalmaktadır. Bu bilgi, iki aşamalı global bir eşikleme metodunun kullanılmasına olanak sağlamaktadır:

- (i). $Sim_D \geq Thr_D^1$
- (ii). $Sim_D \geq Thr_D^2$ & $Sim_R \geq Thr_R$

Analizler sonucunda tüm eşlemeler tarafından global bir Daisy ölçütü (Sim_D) eşik değerinin $Thr_D^1 \geq 0.2$ sağlanması gerektiği anlaşılmıştır. Ancak çizgilerin tampon bölgelerinin elde edilen bilgilerin benzer olması sonucu, bazı hatalı eşlemeler bu eşik değerini rahatlıkla sağlayabilmektedir. Eşik değerini arttırmak ise sorunu kısmen çöze de birçok doğru eşlemeyi de silmekte ve sonuçta eşleme performansı düşmektedir. Bu nedenle, ikinci eşiklemede Daisy ölçütü (Sim_D) eşik değeri oldukça yüksek tutularak ($Thr_D^2 \geq 0.85$) aynı zamanda Mükerrer Eşleme (Sim_R) değerleri de $Thr_R \geq 0.5$ incelenmiş, böylece doğru eşlemelerin elenmesinin önüne geçilmiştir. Bu sayede, geriye kalan hatalı eşlemelerin birçoğu elenirken herhangi bir doğru eşlemenin elenmesinin önüne geçilmiştir.

Son aşamada ise stereo görüntü çiftlerinde otomatik eşlemeleri yapılan çizgilerin üç boyutlu geri-çatımı, yine otomatik olarak uzaysal düzlem kesişimi ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3).



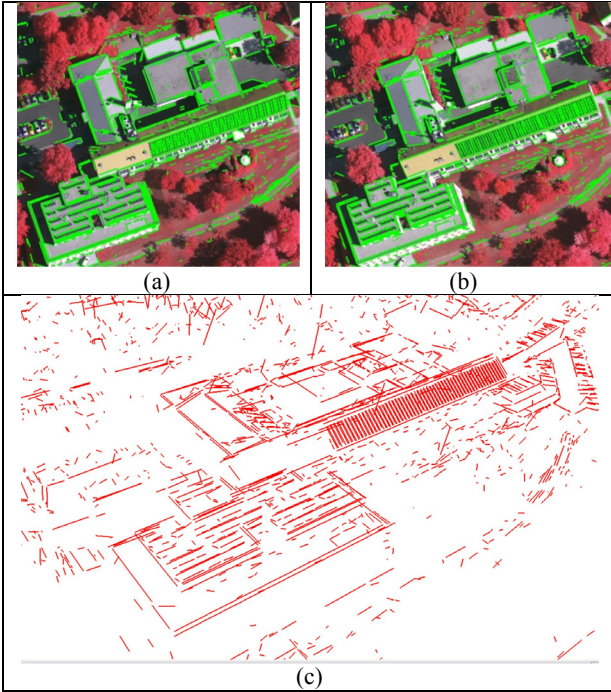
3. TEST ALANLARI VE ELDE EDİLEN SONUÇLAR

Geliştirilen yaklaşımın performansı Almanya'dan seçilen dört farklı test alanında değerlendirilmiştir. Tüm test alanları, Alman Fotogrametri ve Uzaktan Algılama Birliği'nin (DGPF) de resmi test sahası olan Stuttgart – Vaihingen yerleşim bölgesinin DMC kamerasıyla %70 boyuna bindirmeli çekilmiş 8 cm çözünürlüklü görüntülerinin kapsadığı alanlardan seçilmiştir (Cramer ve Haala, 2009). Test alanları çeşitli yerleşim karakteristiklerine göre özel olarak seçilmiş olup, test alanlarında bulunan yapılar çok farklı karakteristikte çatı tipleri (düz/beşik/karmaşık) ve yerleşim şekilleri barındırmaktadır (Şekil 4).

<p>(a)</p>	<p>(b)</p>	Toplam Çizgi Sayısı	Sol	1823
			Sağ	1877
		Eşleme Sonucu	Toplam	1106
			Doğru	1088 (%98.4)
			Hatalı	18 (%1.6)
<p>(c)</p>	<p>(d)</p>	Toplam Çizgi Sayısı	Sol	2145
			Sağ	2151
		Eşleme Sonucu	Toplam	1207
			Doğru	1193 (%98.8)
			Hatalı	14 (%1.1)
<p>(e)</p>	<p>(f)</p>	Toplam Çizgi Sayısı	Sol	3035
			Sağ	3175
		Eşleme Sonucu	Toplam	1901
			Doğru	1874 (%98.6)
			Hatalı	27 (%1.4)
<p>(g)</p>	<p>(h)</p>	Toplam Çizgi Sayısı	Sol	1618
			Sağ	1715
		Eşleme Sonucu	Toplam	900
			Doğru	881 (%97.8)
			Hatalı	19 (%2.1)

Şekil 4. Geliştirilen yöntemin sol (a-c-e-g) ve sağ (b-d-f-h) stereo görüntülerdeki eşleme sonuçları.

Stereo görüntülerde epipolar çizgisi boyunca 50 m (≈ 162 piksel) uzunluğunda bir arama alanı tanımlanmış ve sonuçta otomatik olarak yapılan eşlemeler manuel olarak üretilen verilerle değerlendirilmiştir. Elde edilen eşleme sonuçları yine Şekil 4'te verilmiştir. Tüm test alanları için elde edilen çizgilerin %55 ve üstü bir oranı otomatik olarak eşleştirilmiş ve elde edilen bu eşlemelerin %98 ve üzeri bir oranı doğru eşleme olarak bulunmuştur. Tüm test alanlarında birbirlerinden çok farklı özellikte yapılar bulunmasına rağmen, çok yakın doğruluk seviyelerine ulaşılması geliştirilen yaklaşımın görüntü eşleme açısından başarısını ve sağlamlığını ortaya koymaktadır. Geri-çatım işlemi sonunda üç boyutlu olarak elde edilen doğrusal çizgiler (Şekil 5c), test alanının 3.4 cm doğrulukla elde edilmiş referans LIDAR nokta kümesi verisi kullanılarak üç boyutlu olarak karşılaştırılmış ve sonuçta toplam RMS hata değeri 13.6 cm (1.7 piksel) olarak hesaplanmıştır (Ok vd., 2010). Referans verisinin içerdiği hata değeri ve kullanılan görüntünün çözünürlük değerinin 8 cm olduğu düşünüldüğünde üretilen üç boyutlu doğrusal çizgilerin hassasiyet değerinin hedeflenen seviyeyi rahatlıkla yakaladığı anlaşılmıştır.



Şekil 5. (a, b) Stereo görüntü ve eşlemeler, (c) geri-çatım işlemi sonunda üç boyutlu olarak elde edilen doğrusal çizgiler.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, stereo hava fotoğraflarından elde edilen çizgilerin otomatik olarak eşlenmesi ve geri-çatımı amacıyla kullanılabilen yeni bir yaklaşım geliştirilmiştir. Çift-tabanlı eşlemeler sonucu oluşan hataların büyük bir kısmı geliştirilen son-işleme yöntemi ile başarılı bir şekilde temizlenmiştir. Test alanlarından elde edilen performans değerleri incelendiğinde, geliştirilen yaklaşımın otomatik görüntü eşleme açısından başarılı ve sağlam olduğu anlaşılmaktadır.

Geliştirilen yöntemi literatürde varolan diğer çizgi eşleme yöntemlerinden ayıran en önemli özelliği, eşleme işlemi sırasında çizgilerin birbirleriyle olan ilişkilerini çift-tabanlı olarak dikkate alması ve bu sayede görüntülerde sıkça karşılaşılan “tekrarlanan örüntü ve desenler” probleminde karşı sağladığı başarıdır. Yöntemin diğer önemli avantajları ise görüntü eşleme sırasında herhangi bir ek veriye (stereo DSM,

Lidar vb.) ihtiyaç duymaması ve epipolar sıralama gibi problemleri bir koşul kullanmamasıdır. İleriye dönük olarak, stereo görüntüler için geliştirilen bu yöntemin yeni kameralar ve görüntüleme sistemleri tarafından daha fazla sayıda (≥ 3) bindirmeli görüntü sağlanması durumunda nasıl uyarlanabileceği ve/veya geliştirilebileceği araştırılmaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada kullanılan Vaihingen verisi Alman Fotogrametri ve Uzaktan Algılama Birliği (DGPF) tarafından sağlanmıştır: <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/dgpf/DKEP-Allg.html>

KAYNAKLAR

Bay, H., Tuytelaars, T., ve Van Gool, L., 2006. SURF: Speeded Up Robust Features. In: *European Conf. Computer Vision*.

Cramer, M., ve Haala, N., 2009. DGPF Project: Evaluation of digital photogrammetric aerial based imaging systems – overview and results from the pilot centre. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVIII (1-4-7/W5)*, CD-ROM.

Herbert, B., Vittorio, F., ve Luc, V.G., 2005. Wide-baseline Stereo Matching with Line Segments, in: *IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*.

Mikolajczyk, K., ve Schmid, C., 2005. A Performance Evaluation of Local Descriptors. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 27(10), pp. 1615-1630.

Lowe, D.G., 2004. Distinctive Image Features from Scale Invariant Keypoints, *International Journal of Computer Vision*, 20(2), pp. 91-110.

Ok, A.O., Wegner, J.D., Heipke, C., Rottensteiner, F., Soergel, U., ve Toprak, V., 2010. A New Straight Line Reconstruction Methodology From Multi-Spectral Stereo Aerial Images. *Proceedings of Photogrammetric Computer Vision and Image Analysis Conference, Paris, IntArchPhRS Vol. 38(3A)*, pp. 25-30.

Schmid, C., ve Zisserman, A., 1997. Automatic Line Matching Across Views. In: *Proceedings of CVPR*, pp. 666-671.

Scholz, S., Moons, T., Ade, F., ve Van Gool, L., 2000. Exploiting Color for Edge Extraction and Line Segment Stereo Matching. In: *IAPRS*, pp. 815-822.

Tola E., Lepetit, V., ve Fua, P., 2010. DAISY: An Efficient Dense Descriptor Applied to Wide-Baseline Stereo. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 32(5), pp. 815-830.

Wang, Z., Wu, F., ve Hu, Z., 2009. MSLD: A Robust Descriptor for Line Matching. *Pattern Recognition* 42, pp. 941-953.

Zhang, C., ve Baltsavias, E. P., 2000. Edge matching and 3D road reconstruction using knowledge-based methods, *Schriftenreihe der Fachrichtung Geodäsie, Darmstadt, Germany*, 10, pp. 251-265.

Zhang, L., 2005. Automatic Digital Surface Model (DSM) Generation from Linear Array Images, PhD Thesis, Swiss Institute of Technology Zurich.