

ÇOK BANTLI STEREO HAVA FOTOĞRAFLARINDAN DOĞRUSAL ÇİZGİLERİN OTOMATİK GERİ-ÇATIMI İÇİN YENİ BİR YAKLAŞIM

A.Ö. Ok¹, J.D. Wegner², C. Heipke², F. Rottensteiner², U. Sörgel², V. Toprak¹

¹Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Jeodezi ve Coğrafi Bilgi Teknolojileri, 06531, Ankara, Türkiye.
(oozgun, toprak)@metu.edu.tr

²Hannover Üniversitesi, Fotogrametri ve Jeoinformasyon Enstitüsü, 30167, Hannover, Almanya.
(wegner, heipke, rottensteiner, soergel)@ipi.uni-hannover.de

ÖZET

Bu çalışmanın başlıca hedefi bina ve yol gibi doğrusal ağırlıklı ana coğrafi detayların stereo hava fotoğraflarından otomatik olarak üretilmesinin temelini oluşturacak yeni bir stereo çizgi eşleme yaklaşımı geliştirmektir. Bu bağlamda bu çalışma, belirlenen hedefin en önemli aşamalarından olan hava fotoğraflarından (i) iki boyutlu doğrusal çizgilerin çıkarılmasını, (ii) elde edilen doğrusal çizgilerin stereo görüntülerde eşlenmesini ve (iii) üç boyutlu geri-çatımını içermektedir. Geliştirilen yaklaşımın testleri farklı derecelerde yoğunluk içeren ve farklı türlerde yapılar barındıran Almanya'ya ait üç farklı alanda gerçekleştirilmiştir. Elde edilen eşleme sonuçlarına göre test alanları (Vaihingen, Hannover, Dorsten) için sırasıyla %94, %92 ve %95 doğru eşleme seviyelerine ulaşılmıştır. Diğer taraftan, Vaihingen bölgesinde geri-çatım işlemi sonunda üç boyutlu olarak elde edilen doğrusal çizgiler, test alanına ait referans LIDAR nokta kümesi verisi kullanılarak üç boyutlu olarak karşılaştırılmış ve sonuçta toplam RMS hata değeri 13.6 cm (1.7 piksel) olarak hesaplanmıştır. Görüntü eşleme ve geri-çatım sonuçları beraber olarak ele alındığında, stereo görüntülerden doğrusal çizgilerin otomatik geri-çatımı için geliştirilen yaklaşımın oldukça başarılı ve sağlam olduğu anlaşılmaktadır.

Anahtar Sözcükler: Hava Fotoğrafları, Doğrusal Çizgiler, Görüntü Eşleme, Üç Boyutlu Geri-Çatım.

A NEW APPROACH FOR THE AUTOMATIC RECONSTRUCTION OF STRAIGHT LINE SEGMENTS FROM MULTI-SPECTRAL STEREO AERIAL IMAGES

ABSTRACT

The aim of this study is to develop a new stereo line matching approach that can be served as a fundamental step for the automated generation of linear geographic features such as buildings and roads. In this context, this study includes the topics of (i) 2-D extraction of the straight lines from aerial images, (ii) stereo matching of the extracted lines, and (iii) the 3-D reconstruction. The tests of the developed approach are performed in three different test sites selected from Germany which involve different building formations with various complexity levels. Based on the results of the line matching, 94%, 92% and 95% matching rates are achieved for the related test sites (Vaihingen, Hannover, Dorsten), respectively. Besides, the results of the reconstruction of the Vaihingen site is compared with the reference LIDAR point dataset of the test site and the final RMS distance is computed to be 13.6 cm (1.7 pixel). If the results for the matching and reconstruction are concurrently taken into account, the developed approach for the automated reconstruction of linear features in stereo images are found to be rather successful and robust.

Keywords: Aerial Images, Straight Lines, Image Matching, 3D Reconstruction.

1. GİRİŞ

Stereo hava fotoğraflarından bina ve yol gibi coğrafi detayların çıkarılması günümüzde deneyimli operatörler tarafından manüel olarak yapılmaktadır. Ancak bu coğrafi detayların manüel olarak sayısallaştırılması işlemi sağladığı üstün doğruluk seviyesi ve getirdiği mükemmeliyete rağmen nitelikli personel zorunluluğunu da beraberinde getirmektedir. Bu nedenlerden ötürü, ultra yüksek çözünürlüklü (6 – 8 cm) hava fotoğraflarından üç boyutlu tam otomatik nesne çıkarımı son yıllardaki modern fotogrametri ve uzaktan algılama uygulamalarındaki en önemli araştırma konularından biri haline gelmiştir.

Stereo görüntülerden üç boyutlu nesne çıkarımının önündeki en önemli engel, hiç şüphesiz ki, görüntü eşleme olarak adlandırılan ve her iki görüntünün birbirlerine karşılık gelen eşlenik kısımlarının otomatik olarak belirlenmesini hedefleyen araştırmadır. Görüntü eşleme yöntemleri temel olarak (i) Alan-tabanlı, (ii) Detay-tabanlı ve (iii) İlişkisel-(Sembolik) tabanlı olmak üzere üç farklı kategoride ele alınmaktadır (Schenk, 1999). Alan-tabanlı yöntemler genel olarak görüntüleri oluşturan piksel değerlerini temel alırlar ve bu değerleri çeşitli benzerlik ölçütleri ve yöntemleri kullanarak her iki görüntüde karşılaştırırlar. Detay-tabanlı yöntemler ise, öncelikle her görüntüden yekdiğerinden bağımsız olarak nokta, kenar ve/veya alan gibi belirgin detayları çıkarırlar. Devamında, bu detayların

var olan öz nitelik bilgileri temel alınarak benzerlik karşılaştırması yapılarak eşleme gerçekleştirilir. İlişkisel-tabanlı yöntemler ise, nokta, kenar ve/veya alan gibi görüntülerden çıkarılan detayların birbirleriyle olan yapısal ilişkilerini kullanarak eşleme yaparlar. Özellikle son yirmi yıl içerisinde, her üç yöneme ilişkin azımsanmayacak sayıda çalışmalar yapılmasına ve çok çeşitli yöntemler geliştirilmesine karşın, günümüzde stereo görüntü eşleme hala çözümlenememiş bir konudur. Bunun temel nedeni ise, görüntü eşleme sırasında karşılaşılan çok çeşitli ve farklı kısımları içeren problemlerdir (Manual of Photogrammetry, 2005):

- Stereo görüntülerdeki farklı perspektif projeksiyon geometrileri
- Görülemeyen alanlar
- Çok çeşitli yüzeyler ve farklı yansıtma özellikleri
- Görüntülerde oluşan değişik ışık ve aydınlatma durumları
- Hatalı elde edilen iç ve/veya dış yöneltme parametreleri
- Tekrarlanan örüntü ve desenler
- Düşük seviyedeki görüntü karşılıkları
- Hatalı veya yanlış yaklaşık değerlere bağlı yakınsama problemleri

Yoğun bir kentsel alanı içeren bir stereo görüntü çifti ele alındığında, görüntü eşleme sırasında yukarıda verilen problemlerin neredeyse tamamının dikkate alınması gerekmektedir. Bununla beraber, adı geçen problemler arasında görüntü eşleme sırasında en büyük sorunu hiç şüphesiz “görülemeyen alanlar” oluşturmaktadır. Bunun temel nedeni ise, yoğun kentsel alanlarda sıkça karşılaşılan insan yapımı nesnelere (bina, köprü vb.) kaynaklanan yükselti süresizlikleridir. Genel olarak alan-tabanlı yöntemler ele alındığında, yükselti süresizliklerinin sonucu olarak görüntülerde meydana gelen piksel değer farklılıklarının görüntü eşleme araştırmasını oldukça problemlili hale getirdiği aşikârdır (Baillard ve Dissard, 2000). Bu nedenle son yıllardaki araştırmalar detay-tabanlı yöntemlere doğru bir eğilim göstermiştir. Literatürde bugüne kadar yapılan çalışmalar incelendiğinde en çok araştırmanın nokta detaylar üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir (örn. Belongie vd., 2002; Lowe, 2004; Mikolajczyk ve Schmid, 2005; Bay vd., 2006). Fakat nokta detaylar, görüntülerin kapsadığı alanın önemli bir kısmı için çıkarılamamakta (veya eşlenememekte) ve sonuç olarak çoğunlukla görüntüler arası geometrik ilişkilerin bulunması amacıyla kullanılmaktadır. Bu nedenle, kenar detaylar günümüzde detay-tabanlı eşlemede önemli bir yer teşkil etmeye başlamıştır. Bunun en önemli nedeni ise, görüntüdeki renk ve/veya ton farklılıklarının bir sonucu olarak çıkarılan kenar detayların, aslında görüntülenene alandaki yükselti süresizliklerini işaret etmesinden kaynaklanmaktadır (gölge gibi yapay kenarlar hariç). Bu da, görüntüler arasında başarılı bir kenar eşleme gerçekleştirildiğinde, fotogrametrinin en önemli araştırma konularının başında gelen görüntülerin otomatik çıkarılması, görüntülenene alan ile ilgili üç boyutlu nesnelere üretilmesi, havai nirengi işleminin yapılması ve/veya iyileştirilmesi gibi konuların çözümlenmesine yardımcı olmakta ve büyük kolaylıklar getirmektedir.

Günümüze kadar yapılan kenar bazlı görüntü eşleme çalışmaları ele alındığında, bu çalışmaların neredeyse tamamının doğrusal kenarlar (çizgiler) üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir (Schmid ve Zisserman, 1997; Henricsson, 1998; Collins vd., 1998; Scholze vd., 2000; Park vd., 2000; Zhang ve Baltsavias, 2000; Noronha ve Nevatia, 2001; Kim ve Nevatia, 2004; Suveg ve Vosselman, 2004; Zhang, 2005; Habib vd., 2010). Bunun temel nedeni ise bina, köprü, yol gibi insan yapımı ana coğrafi detayların çok büyük bir oranda doğrusal ağırlıklı yapısından kaynaklanmaktadır. Literatürde doğrusal kenar görüntü eşleme işlemi için tanımlanmış olan tüm algoritmalar, görüntü çekim geometrisi, hedeflenen nesnelere yapıları, görüntülenene alan vb. bilgileri kullanarak çok çeşitli koşullar tanımlamışlardır. Çalışmaların büyük çoğunluğu ilk ve temel koşul olarak epipolar geometrisinden yararlanılarak oluşturulan dört kenarları bir arama alanını kullanmaktadırlar (Collins vd., 1998; Noronha ve Nevatia, 2001; Kim ve Nevatia, 2004; Suveg ve Vosselman, 2004). Bu alanı tanımlamanın hedefi, ilk görüntüden elde edilen bir detayın diğer görüntüde yaklaşık olarak hangi kısımda gözlenebileceğinin önceden belirlenerek, (i) aranacak kısmın daraltılması sonucu eşleme süresini azaltmak ve (ii) daha sağlam bir eşleme yapmak amacıyla uygulanmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, doğrusal kenarlara ait temel geometrik parametreler (yönelim, uzunluk, orta nokta vb.) yine birçok çalışmada temel koşul olarak tanımlanmış olmasına rağmen, bu parametrelerin perspektif geometri ve görüntü çekim anında oluşan etkenlerden dolayı güvenilir olmadığı Zhang (2005) tarafından açıkça ifade edilmiştir. Bu nedenle bazı çalışmalar, bu temel geometrik parametrelere ek olarak, doğrusal kenarların her iki yanında tanımlanan tampon bölgeler içine düşen radyometrik bilgileri de koşul olarak eklemiştir (Henricsson, 1998; Scholze vd., 2000;

Zhang ve Baltasvias, 2000). Bu sınırlandırmalara ek olarak Suveg ve Vosselman (2004) tarafından benzersizlik ve epipolar sıralama, Zhang (2005) tarafından biçimsel süreklilik koşulları getirilmiş olsa da tanımlanan koşullar birlikte ele alındığında herhangi bir stereo görüntü eşlemede doğrusal kenarlarda oluşan çoklu-benzeşme sorunu çözülememektedir. Bu nedenle, literatürdeki birçok çalışma, çoklu-eşleme problemi bulunan kenarlar arasından en uygun eşleniği seçmek için farklı yöntemler geliştirmişlerdir. Bu yöntemler arasında, dinamik programlama (Yip ve Ho, 1996; Baillard ve Dissard, 2000), ağırlıklı benzerlik fonksiyonları (Henricsson, 1998), modal analizler (Park vd., 2000) ve olasılıksal optimizasyon yöntemi (Zhang ve Baltasvias, 2000; Zhang, 2005) sayılabilir. Diğer taraftan, bazı araştırmacılar görüntü eşleme işlemini kolaylaştırmak ve çoklu-benzeşme sorununun önüne geçebilmek amacıyla eşleme sırasında veya sonrasında kullanılmak amacıyla yardımcı verilerden yararlanmışlardır. Örneğin, Schmid ve Zisserman (1997), Collins vd. (1998), Noronha ve Nevatia (2001), Kim ve Nevatia (2004) görüntü eşleme sırasında ek görüntü(ler) kullanan araştırmacılarıdır. Bunun yanı sıra Baillard ve Dissard (2000), Jung ve Pappas (2003), Taillard ve Deriche (2004) alan-tabanlı eşleme sonucu üretilmiş olan Sayısal Yüzey Modeli'ni (SYM) kenar eşleme işleminin performansını arttırmak için kullanmıştır. Bir diğer çalışmada ise Zhang (2005) öncesinde görüntülerden eşlediği nokta kümelerini kenar eşleme algoritmasıyla bütünleştirerek oluşması muhtemel yanlış eşlemelerin önüne geçmeye çalışmıştır. Yakın zamanda yapılan bir çalışmada ise Habib vd. (2010) LIDAR verisini kenar-tabanlı görüntü eşleme işlemine adapte etmiş ve yüksek çözünürlüklü hava fotoğraflarının kenar-tabanlı eşlenmesi için farklı bir yaklaşım ortaya koymuştur.

Yukarıda verilen literatür taraması özetinden de anlaşılacağı üzere stereo görüntülerde kenar-tabanlı eşleme oldukça zor ve karmaşık bir problemdir. Bugüne kadar gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde bu problemin henüz çözülemediği ve sadece belirli özellikteki görüntülerle sınırlı kaldığı sonucu ortaya çıkmaktadır. Her ne kadar son zamanlarda yapılan çalışmalarda kullanılan yöntemler, stereo görüntü(ler) ek olarak yardımcı veriler (ek görüntü(ler), SYM, nokta kümeleri, LIDAR vb.) kullansa da, bu yöntemler sonucunda elde edilen görüntü eşleme başarısı tamamıyla kullanılan yardımcı verilerin performanslarına bağlı kalmaktadır.

Bu çalışmanın başlıca hedefi bina ve yol gibi doğrusal ağırlıklı ana coğrafi detayların sadece stereo hava fotoğrafları kullanılarak otomatik olarak üretilmesinin esasını oluşturacak yeni bir yaklaşım geliştirmektir. Bu bağlamda bu çalışma, belirlenen hedefin en önemli aşamalarından olan görüntülerden (i) iki boyutlu doğrusal kenarların çıkarılmasını, (ii) elde edilen doğrusal kenarların stereo görüntülerde eşlenmesini ve (iii) üç boyutlu geri-çatımını içermektedir. İlk aşamada stereo hava fotoğrafları bağımsız olarak ele alınmış ve görüntü işleme yöntemleri kullanılarak iki boyutlu doğrusal kenarlar çıkarılmıştır. 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. Literatürde doğrusal çizgilerin eşleştirilmesi için daha önce tanımlanmış olan geometrik ve fotometrik koşullar geliştirilmiş ve bunlara ilaveten üç adet yeni koşul üretilmiştir. Çift-tabanlı eşlemeler ağırlıklı benzerlik kriterine göre belirlenmiş ve oluşması muhtemel birebir benzeşme problemleri yeni bir olasılık çıkarımı yöntemi ile çözülmüştür. Son aşamada ise, stereo görüntü çiftlerinde eşlemeleri yapılan doğrusal kenarların üç boyutlu geri-çatımı, fotogrametrik uzaysal düzlem kesişimi yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen yöntemin tüm aşamalarında MatLab programlama dili kullanılmış olup tamamıyla bağımsız ve aynı zamanda grafiksel ara yüz destekli olarak çalışan bir yazılım da ayrıca geliştirilmiştir.

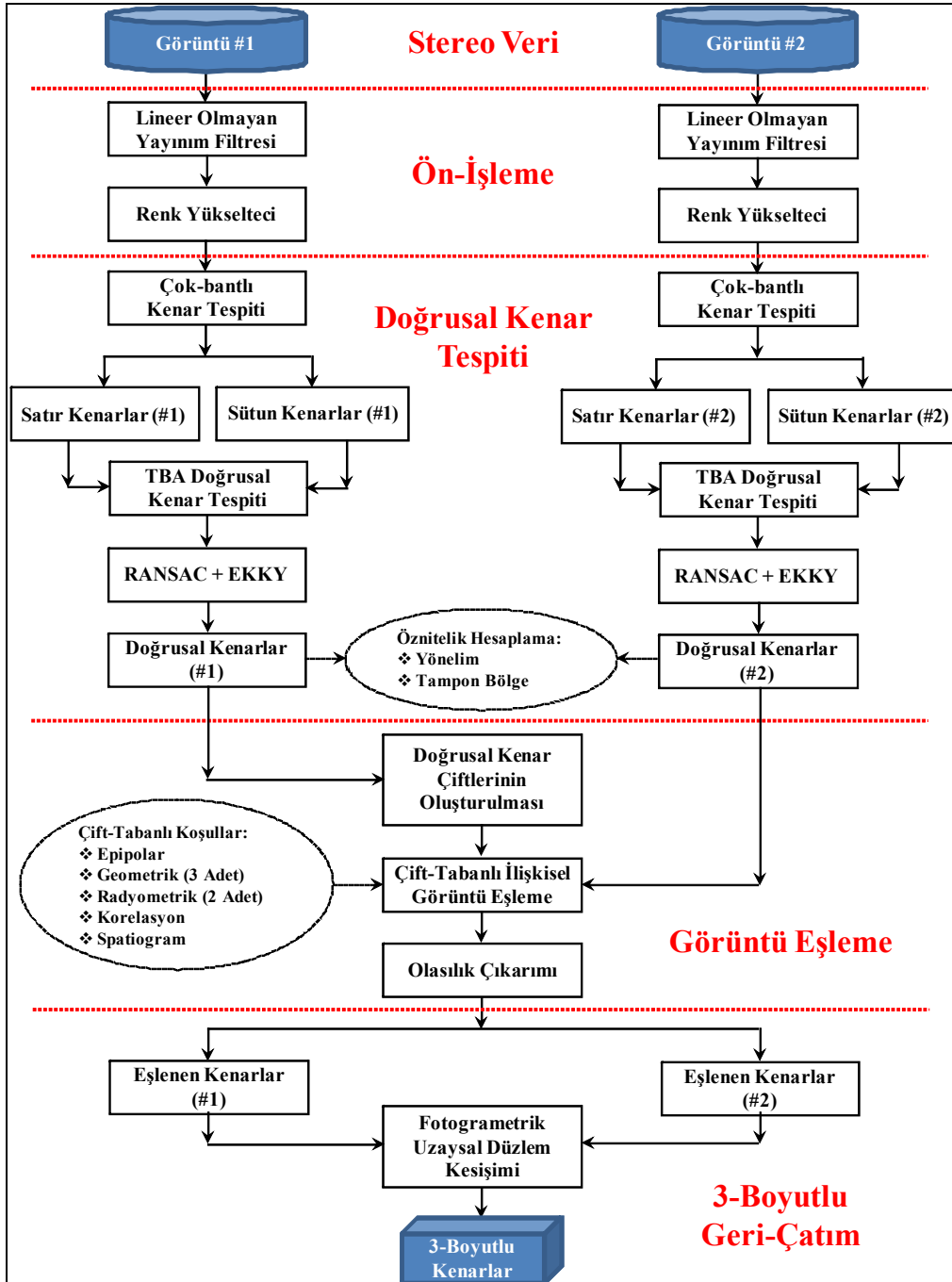
2. YÖNTEM

Bu çalışmada geliştirilen, ultra yüksek çözünürlüklü hava fotoğraflarından üç boyutlu doğrusal kenarların üretilmesini sağlayan yaklaşımın akış diyagramı Şekil 1'te verilmiştir. İzlenen yöntem toplam dört ana kısımdan oluşmaktadır: (i) Ön-işleme, (ii) Doğrusal Kenar Tespiti, (iii) Görüntü Eşleme ve (iv) Üç Boyutlu Geri-Çatım.

2.1. Ön-işleme

İlk aşamada, ham olarak elde edilmiş stereo görüntüler (analog veya dijital) çekim sırasında veya sonrasında oluşması muhtemel gürültü değerlerinin azaltılması amacıyla filtrelenmiştir. Bu işlem için halen literatürde yaygın olarak kullanılan ve tek bant üzerinde çalışan alçak-geçirgen filtrelerden farklı

olarak görüntüdeki süreksizlikleri (veya kenarları) koruyan ve sadece homojen alanları filtrelemeyi hedefleyen lineer olmayan yayılım filtresi (Weickert, 1997) kullanılmıştır. Buna ek olarak uygulanan filtrede, günümüz hava fotoğraflarının doğasında var olan çok bant bilgisi de efektif olarak kullanılmış ve filtreye adapte edilmiştir. Ayrıca, filtreleme süreci üç seviyeli olarak tanımlanmış ve bu sayede görüntüdeki radyometrik süreksizlikler üzerindeki gürültü seviyesi de iyice azaltılmıştır (Şekil 2b). İkinci aşamada, kenar bulma algoritmasının performansını artırmak için filtrelenen görüntüdeki renk farklılıkları yeni bir renk yükseltici (Weijer vd., 2006a) kullanılarak artırılmıştır. Hava fotoğrafları, özellikle analog kamera ile çekilen görüntülerde yer alan nesnelere (örneğin bir bina ile arka-planı) arasındaki renk kontrast farkı genelde istenilen düzeye ulaşamamakta ve sonuçta yoğun ve eksiksiz bir kenar bilgisi elde etmek zorlaşmaktadır. Bu durumun yan etkilerini olabildiğince azaltmak amacıyla, görüntü ilk olarak orijinal renk uzayından karşıtlık uzayına dönüştürülmüş ve bu uzayın renk bilgisini içeren ilk iki doğrultusunun değerleri belirli oranda ($k>1$) artırılarak aranılan renk kontrast seviyesi yakalanmıştır. Devamında, değişikliğe uğrayan karşıtlık uzayı, tekrar orijinal renk uzayına dönüştürülmüş ve sonuçta görüntülerdeki renk kontrast değerleri hedeflenen seviyeye çıkartılmıştır (Şekil 2c).

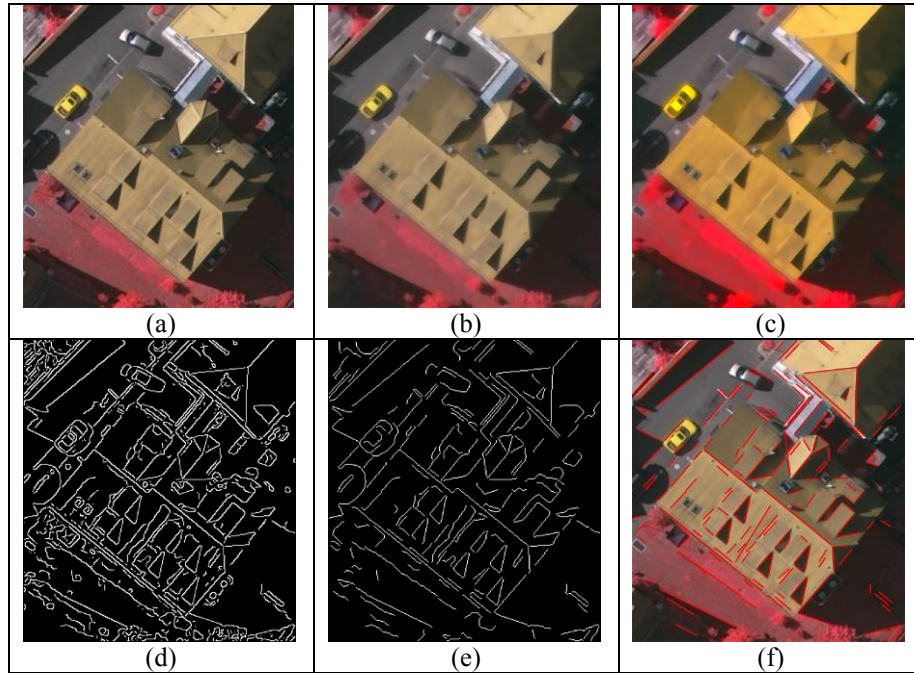


Şekil 1. Geliştirilen yaklaşımın akış diyagramı

2.2 Doğrusal Kenar Tespiti

Filtrelemesi ve renk kontrast düzeltmesi yapılan görüntüden kenarların mümkün olan en başarılı şekilde tespiti amacıyla Weijer vd. (2006b) tarafından geliştirilmiş bir kenar tespit yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, hava fotoğraflarının doğasında bulunan çok-bant (R-G-B-NIR vs.) bilgisini kullanmakta ve temel olarak değişik bantlardan elde edilen farklı mekânsal türevleri tensör matematiği kullanarak birleştirmektedir. Böylece, farklı bantlarda bulunan aynı yönelime sahip kenar türevleri birbirlerini güçlendirmekte ve sonuçta tüm bantlardaki kenar bilgilerini kapsayan tek ve bütün bir kenar görüntüsü elde edilmektedir (Şekil 2d). Görüntülerden elde edilen yoğun kenar bilgisi (Şekil 2d) arasından doğru ve sağlam bir şekilde doğrusal kenarların bulunması amacıyla bu çalışmada iki aşamalı bir yol önerilmiştir: (i) doğrusal kenar parçalarının çıkarılması ve (ii) çıkarılan doğrusal parçaların vektör formatında bulunan çizgilere dönüştürülmesi.

Bu çalışmada doğrusal kenar parçalarının bulunması amacıyla Lee vd. (2006) tarafından geliştirilmiş bir yöntem kullanılmıştır. Kenar görüntüsü öncelikle otomatik olarak satır ve sütun olarak iki sınıfa ayrılmış (Şekil 1) ve her iki sınıfa ait olan kenar parçalarına temel bileşenler analizi (TBA) uygulanarak her parçanın doğrusal olup olmadığına karar verilmiştir. Yöntemin ve uygulanan algoritmaların detayları Lee vd. (2006)'da açıkça verilmiş olup, bu çalışmada, yöntemin uygulaması esnasında iki temel problem gözlenmiş ve bu problemler için ayrıca çözümler üretilmiştir. Sonuçta, elde edilen satır ve sütun doğrusal kenar parçaları tek bir görüntüde birleştirilmiştir (Şekil 2e). Elde edilen doğrusal kenarlar yinelemeli bir rastgele örnekleme (RANSAC) yöntemi (Fischer ve Bolles, 1981; Zuliani vd., 2005) ve devamında en küçük kareler yöntemi (EKKY) kullanılarak iki boyutlu vektör formatında doğrusal çizgilere dönüştürülmüştür. Devamında, her bir doğrusal çizginin görüntü düzleminde yönelim bilgisini içeren temel öznitelik bilgisi elde edilmiştir. Buna ek olarak, her çizgi için sağında ve solunda olmak üzere iki adet tampon bölge oluşturulmuş ve bu tampon bölgenin içine düşen piksellere ait ortalama değerleri de minimum ortak değişim (co-variance) determinanı (Meucci, 2005) metodu kullanılarak sağlam bir şekilde hesaplanmıştır.



Şekil 2. (a) Vaihingen test görüntüsünden küçük bir kısım, (b) filtrelenmiş görüntü, (c) renk yükseltici uygulanmış görüntü, (d) çok-bantlı kenar tespiti ile elde edilen kenarlar, (e) doğrusal kenarlar ve (f) üretilen doğrusal çizgiler.

2.3. Çift-Tabanlı Görüntü Eşleme

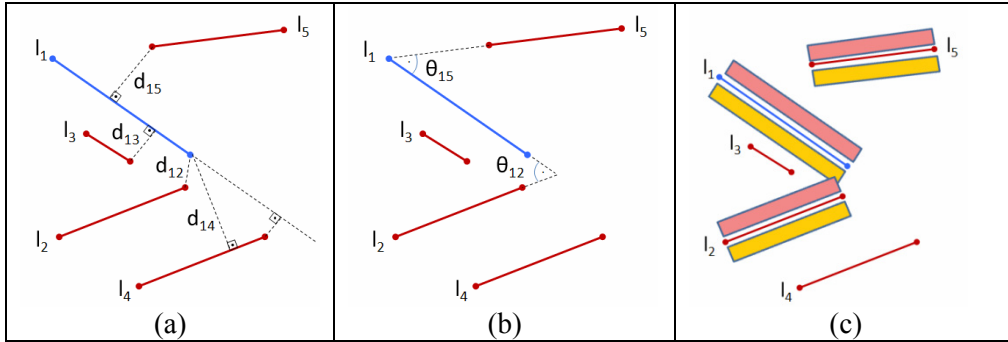
Bu çalışmada geliştirilen çift-tabanlı görüntü eşleme yöntemi temel olarak üç aşamadan oluşmaktadır: (i) referans görüntüden doğrusal çizgi çiftlerinin oluşturulması, (ii) hedef görüntüden aday doğrusal çizgi çiftlerinin bulunması ve (iii) çizgilerin ilişkisel olarak eşleştirilmesi. Bu çalışmada uygulanan tüm fotogrametrik işlemler (epipolar geometrisi, uzaysal kesişim vb.) için literatürde hâlihazırda

bilinen yöntemler kullanılmıştır. Ayrıca, bu çalışmada, her iki görüntüye ait kapa (κ) yönelim açılarının çok farklı olmadığı ($\pm 5^\circ$) varsayımı yapılmıştır. Bu nedenle, doğrusal çizgilerin bir önceki adımda hesaplanan görüntü yönelim öznellik bilgilerine eşleme öncesinde ek bir iki boyutlu dönüşüm uygulanmamıştır.

2.3.1. Referans Görüntüden Doğrusal Çizgi Çiftlerinin Oluşturulması

Şekil 2f’de görüldüğü gibi kentsel alanlarda çekilmiş ultra yüksek çözünürlüklü görüntülerden çıkarılan doğrusal çizgilerin sayısı çok küçük bir alan ele alınsa bile son derece fazla olabilmektedir. Bu nedenle, bu aşamada, referans görüntüden sadece birbirleriyle obje uzayında bir geometrik ilişkisi (kesişen) bulunan çizgi çiftlerinin oluşturulması amaçlanmıştır. Bunun temel nedeni ise ikinci aşama olan hedef görüntüden aday doğrusal çizgi çiftlerinin bulunması sırasında kesişim noktası bazında sağlanabilecek ve arama işlemini kısaltırken aynı zamanda eşleme doğruluğunu arttıracak bir koşulun getirilebilecek olmasıdır. Fakat bu işlem esnasında, çizgilere ait herhangi bir yükseklik verisi bulunmadığından referans çizgi çiftlerinin oluşturulması için görüntü uzayında toplam 3 temel ölçüt incelenmiştir.

İlk olarak iki çizgi (l_i ve l_j) arasındaki en kısa öklid mesafesini (d_{ij}) tanımlayan yakınlık ölçütü (T_{yak}) uygulanmıştır. Bu ölçüt, iki çizgi arasındaki iki farklı öklid mesafesinin ortak minimum değeri olarak hesaplanmaktadır: (i) çizgilerin uç noktaları arasındaki en kısa mesafe ve (ii) çizgi parçalarının birbirleri üzerine düşen dik doğruların en kısa mesafeleri. Örneğin, Şekil 3a’da verilen l_1 ve l_4 çizgileri arasındaki minimum mesafe d_{14} uzunluğudur. İkinci ölçüt iki çizgi arasındaki kesişim açısıdır (Şekil 3b). Bu çalışmada, iki çizginin bir çift oluşturabilmesi için kesişim açısının belirli bir değerden ($T_{açı}$) fazla olması şartı aranmıştır. Böylece, çift tabanlı eşleme işlemi için gerekli olan kesişim noktasının varlığı elde edilen bütün referans çiftler için sağlanmıştır. Üçüncü ölçüt olarak ise, bütün çizgiler için oluşturulmuş olan tampon bölgeler içine düşen radyometrik değerlerin benzerliğine bakılmıştır (Şekil 3c).



Şekil 3. İki çizgi arasındaki, (a) en kısa mesafe, (b) kesişim açısı ve (c) tampon bölgeler.

Bu ölçütteki temel yaklaşım ise eğer iki çizgi arasında tampon bölgeler bazında herhangi bir radyometrik benzerlik bulunmuyorsa, bu çizgilerin obje uzayında farklı nesnelere ait olma ihtimalinin yüksek olması ve dolayısıyla obje uzayında kesişme ihtimalinin oldukça düşük olmasıdır. Radyometrik değerler çok çeşitli renk uzaylarını içerebilmekte (Henricsson, 1998) ve benzerlikler çok çeşitli şekillerde hesaplanabilmektedir (Zhang ve Baltasvias, 2000). Bu çalışmada, direkt olarak orijinal bantlar ele alınmış ve radyometrik benzerlik kriteri farklı bantlardaki ortalama değerlerin farklarının normlarını alarak hesaplanmıştır. Ayrıca, bu işlem sonucunda iki çizgi arasındaki hangi tampon bölgelerin (sağ ve/veya sol) birbirine daha çok benzediği öğrenilmiş ve bir sonraki aşamada bu bilgi radyometrik benzerlik koşulunun uygulanması sırasında kullanılmıştır.

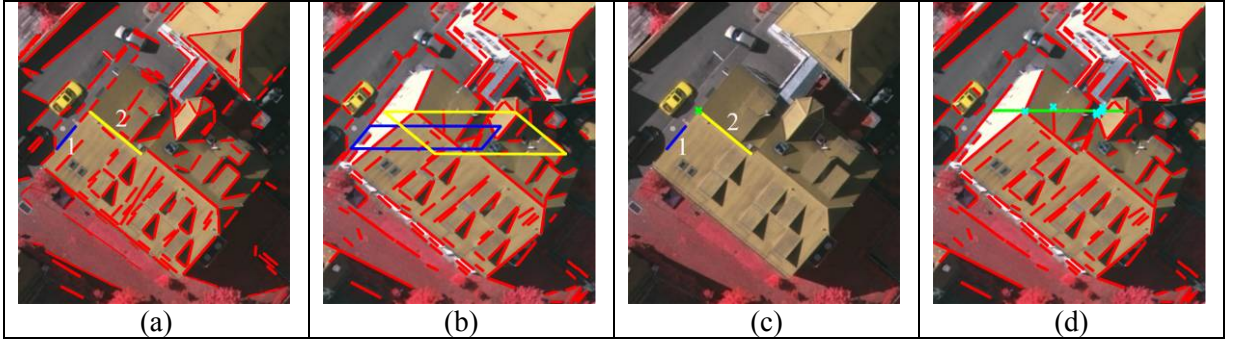
2.3.2. Hedef Görüntüden Aday Doğrusal Çizgi Çiftlerinin Bulunması

Referans görüntüden oluşturulan çizgi çiftleri hedef görüntüde de çift-tabanlı bir yol izlenerek araştırılmıştır. Bu işlemin gerçekleştirilmesi için hedef görüntüde ilgili referans çiftlerine karşılık gelen aday doğrusal çiftlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu aşamada uygulanan ilk koşul literatürde de sıkça karşılaşılan ve alanla ilgili var olan minimum ve maksimum yükseklik bilgisi ve epipolar geometrisinden yararlanılarak oluşturulan dört kenarları bir arama alanıdır (Collins vd., 1998; Noronha ve Nevatia, 2001; Kim ve Nevatia, 2004; Suveg ve Vosselman, 2004). Fakat diğer çalışmalardan farklı olarak çift-tabanlı eşleme iki adet çizgi bulunduğu için her iki çizgi için iki farklı

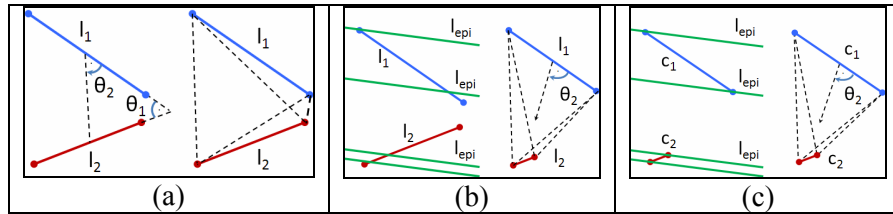
arama alanı tanımlanmış (Şekil 4b) ve her iki arama alanı içine düşen çizgiler bulunmuştur. Devamında, bu çizgilerden aday çiftler yeni bir koşul kullanılarak oluşturulmuştur. İlk olarak referans çiftin kesişim noktası hesaplanmış (Şekil 4c) ve bu noktanın epipolar çizgisi hedef görüntüde (minimum ve maksimum yükseklik bilgisi kullanılarak) belirlenmiştir. Her iki arama alanı içine düşen tüm çizgilerden olası bütün çiftler oluşturulmuş, her biri için ayrı ayrı kesişim noktaları bulunmuş ve epipolar çizgisine dik mesafeleri (epipolar koşulu) hesaplanmıştır. Bu mesafelerden belirli bir ölçütten (T_{epi}) kısa olanlara (Şekil 4d) ait çizgiler gruplanarak aday çizgi çiftleri olarak belirlenmiştir. Bu sayede hem arama alanı ve hem de potansiyel aday çizgi sayısı önemli derecede azaltılmış ve sonuçta olası yanlış eşlemelerin önüne geçilmeye çalışılmıştır.

2.3.3. İlişkisel Koşullar ve Eşleme

Geometrik koşullar: İki çizgi arasındaki geometrik ilişki için Park vd. (2000)'de tanımlanmış olan 3 adet koşul kullanılmıştır. Park vd. (2000), birinci koşul olarak iki çizgi arasında hesaplanan kesişim açısını (θ_1), ikinci koşul olarak ilk çizginin orta noktasından ikinci çizginin orta noktasına olan doğrultu ile ilk çizgi arasında kalan ve saat yönünde hesaplanan açığı (θ_2), üçüncü koşul olarak ise her iki çizginin uç noktalarından birbirlerine ölçülen mesafelerin çizgilerin toplam mesafesine oranı olarak tanımlanmıştır (Şekil 5a). Fakat ikinci ve üçüncü koşullar ele alındığında bu iki koşulun hava fotoğraflarında çizgi uç noktalarının çok çeşitli nedenlerden dolayı (görülemeyen alanlar, gürültü, perspektif hata vb.) farklılıklar göstermesi nedeniyle uygun olmadığı anlaşılmıştır. Bu sebeple, bu çalışmada bu iki koşulun hesaplanmasından önce stereo görüntülerdeki çizgilerin uç noktaları Schmid ve Zisserman (1997)'de tanımlanan ve epipolar geometrisinden faydalanılarak gerçekleştirilen birebir ilişki kullanılarak hizalanmıştır (Şekil 5b ve 5c). Böylece, her iki görüntüde bulunan uç noktalar normalize edilmiş ve geometrik ilişkilerin tanımlanmasında problem yaratan uç noktaların farklılığından kaynaklanan hatalar giderilmiştir.



Şekil 4. (a) Referans görüntüden seçilmiş bir çizgi çifti, (b) hedef görüntüde her iki çizgiye ait arama alanları, (c) l_1 ve l_2 çizgilerinin kesişim noktası ve (d) kesişim noktasının hedef görüntüdeki epipolar çizgisi ve epipolar çizgisine dik mesafesi T_{epi} 'den kısa olan kesişimler.



Şekil 5. (a) Geometrik koşullar, (b) ve (c) epipolar geometrisi kullanılarak çizgi uç noktalarının normalizasyonu

Radyometrik Koşullar: Bu çalışmada iki adet çift tabanlı radyometrik koşul geliştirilmiştir. Bunlardan birincisi referans görüntüde üretilen çiftlerin tampon bölgelerinde bulunan radyometrik değerlerin benzerliğinin aday çizgi çiftinde aranılmasını tanımlayan radyometrik benzerlik koşuludur. Aslında bu koşul referans görüntüden doğrusal çizgi çiftlerinin oluşturulması (bölüm 2.3.1) sırasında öğrenilmiş olan iki çizgi arasındaki hangi tampon bölgelerin (sağ ve/veya sol) birbirine daha çok benzediğine yönelik bilginin aday görüntüde oluşturulan çizgi çiftlerinde araştırılmasıdır. Böylece,

referans ve aday çizgi çiftlerinin kendi aralarında tampon bölgelerinden elde edilen değerlerin benzerliği araştırılmıştır. Devamında ise, ikinci koşul olarak her iki görüntüden oluşturulan referans ve aday çizgi çiftlerinin birebir tampon bölge benzerlikleri araştırılmıştır. Bu araştırmanın gerçekleştirilebilmesi için ise her iki görüntünün hemen hemen aynı zamanda çekilmiş olması (aynı görüntüleme şeritinde çekilme durumu) şartı sağlanmıştır.

Korelasyon Koşulu: Bu çalışmada her bir çizgi çiftinin üç boyutlu bir düzlem yüzeyine ait oldukları varsayımından yola çıkarak çizgi çiftleri ve çizgilerin kesişim noktasının oluşturduğu üçgensel bir alan için korelasyon koşulu geliştirilmiştir. Bu koşul, varsayılan üç boyutlu yüzeyi kullanarak stereo görüntülerde bire bir ilişki kurmakta ve sonuçta bu ilişkiden elde edilen radyometrik değerlerin korelasyonunu hesaplamaktadır. Fakat tanımlanan bu yüzey, çizgi çiftinin ve kesişim noktasının tanımladığı alanın tamamı için bakıldığında sorun yaratabilmektedir. Bunun temel nedeni bina çatısı vb. yapılar üzerinde sıkça gözlenen baca, güneş paneli, çıkma pencere vb. çok çeşitli farklı düzlemsel yüzeylere ait bölümlerdir. Bu nedenle, bu çalışmada, sadece kesişim noktasına belirli bir mesafede ($d=2$ m) olan üçgensel alan tanımlanmıştır (Şekil 6a ve 6b). Şekil 6'da stereo görüntüdeki çizgi çiftlerinden oluşturulan üç boyutlu düzlemin her iki görüntüye projekte edilmiş hali görülmektedir ve her iki çizgi çifti arasındaki korelasyon koşulu sadece bu alan için hesaplanmıştır.

Spatiogram Koşulu: Bir önceki koşulda belirtildiği üzere stereo görüntülerdeki iki çizgi arasındaki alanın tamamının benzerliğine bire bir tanımlanmış bir yüzey ile araştırmak mümkün olmamaktadır. Diğer taraftan, bu benzerlik iki çizginin tanımladığı alanlardaki piksel değerlerinin histogramı incelenerek de gerçekleştirilebilir. Fakat binaların bulunduğu görüntüler ele alındığında hava fotoğraflarında birbirinden çok farklı alanlar oldukça benzer histogram verileri üretebilmektedir. Bu nedenle bu çalışmada, stereo görüntülerde iki çizgi arasına düşen alandaki benzerlik Ó Conaire vd. (2007) tarafından geliştirilen bir yöntem kullanılarak araştırılmıştır. Bu yöntem, ilk defa görüntü eşleme kavramında bu çalışmada kullanılmış ve iki çizgi arasında kalan alandaki çeşitli objelerin (baca, güneş paneli, çıkma pencere vb.) mekânsal bilgileri aynı zamanda histogram verileriyle birleştirilmiş ve eşleme sırasında çift-tabanlı bir koşul olarak kullanılmıştır. Böylece, perspektif görünümün getirdiği farklı görüş açıları ve yüzeylerin etkileri azaltılmış ve çizgi çiftleri arasında kalan alanların benzerliğinin sağlıklı bir şekilde incelenmesi mümkün hale gelmiştir.



Şekil 6. (a) ve (b) üç boyutlu düzlemin her iki görüntüye projeksiyonu sonucu elde edilmiş üçgensel alanlar

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. Öncesinde, bütün koşullar ayrı ayrı olarak 0 ile 1 değer aralığına normalize edilmiş ve değerlendirme sırasında ağırlıklar eşit olarak dağıtılmıştır. Bu değerlendirme sonucunda referans görüntüden oluşturulan her bir çizgi çifti için en benzer çiftler belirlenmiştir. Fakat çift-tabanlı eşlemenin bir sonucu olarak aynı referans çizgi üzerinde birden fazla eşleme gerçekleştirilebilmektedir. Böyle bir durumda, oluşması muhtemel birebir benzeşme problemleri geliştirilen yeni bir olasılık çıkarımı yöntemi ile çözülmüştür. Geliştirilen yöntemin temelinde çift-tabanlı eşlemenin sonucunda her bir çizgi için elde edilen fazla sayıda eşleme bilgisi yatmaktadır. Referans 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. Sonuçta, doğru eşlemelerin oranı yanlış eşlemelere göre fazla sayıda elde edilmekte ve dolayısıyla yanlış eşlemenin tanımlanması ve elenmesi mümkün olmaktadır. Bu çalışmada, çok sayıda doğru ve yanlış eşleme durumları incelenmiş ve oran eşik değeri olarak $p \geq 0.6$ seçilmiştir. Son aşamada ise stereo görüntü çiftlerinde eşlemeleri yapılan doğrusal çizgilerin üç boyutlu geri-çatımı, fotogrametrik uzaysal düzlem kesişimi yöntemiyle gerçekleştirilmiştir.

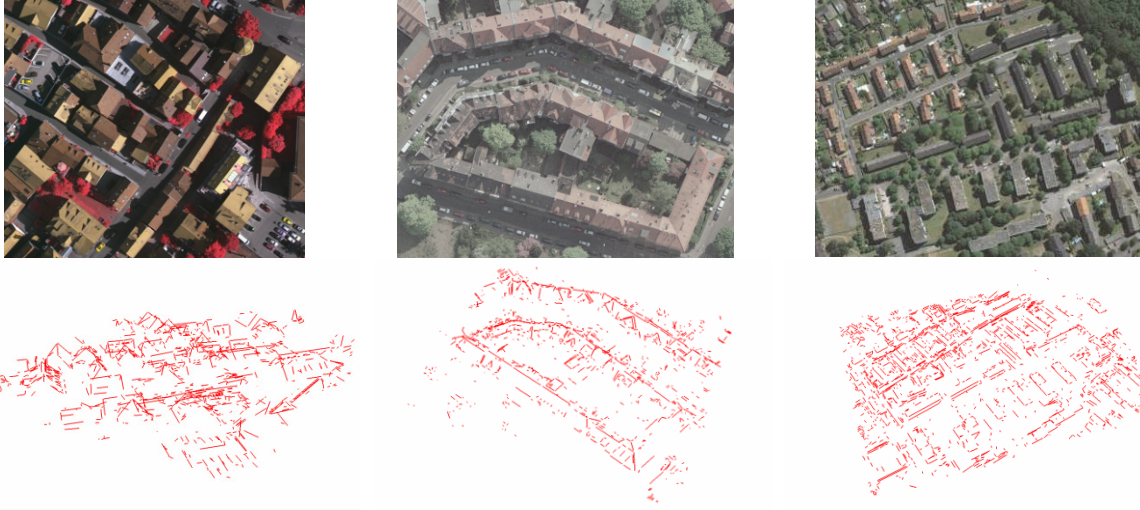
3. TEST ALANLARI VE ELDE EDİLEN SONUÇLAR

Geliştirilen yaklaşım Almanya'dan seçilen üç farklı test alanında değerlendirilmiştir. Birinci test alanı, 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 stereo görüntüsü (Cramer and Haala, 2009) olup yoğun bir kentsel alanı içermektedir (Şekil 7 – 1. sütun). Test alanında, çatı eğimleri 60 dereceyi bulan çok sık ve karmaşık şekilde yerleşmiş binalar bulunmaktadır. İkinci test alanı Hannover şehrinin Schneiderberg bölgesine ait olup, stereo görüntüler RMK TOP30 analog kamerasıyla %60 boyuna bindirmeli çekilmiş ve tarama işlemi sonunda 7 cm çözünürlük elde edilmiştir (Şekil 7 – 2. sütun). Bu bölgenin seçilmesindeki temel etken test alanında bulunan binaların çatılarında aşırı sayıda detay bulundurması ve yerleşimin tamamen bitişik düzende gerçekleştirilmiş olmasıdır. Üçüncü test alanı, Almanya'nın küçük şehirlerinden biri olan Dorsten'dan seçilmiş olup, buraya ait stereo görüntüler DMC kamerasıyla 20 cm çözünürlükte ve %55 boyuna bindirmeli olarak elde edilmiştir (Şekil 7 – 3. sütun). Buradaki binalar ise diğer iki alandan çok farklı olarak ayrı ve bünyelerinde fazla detay barındırmayan beşik ve düz çatı sistemindedir.

Tüm test alanları için otomatik olarak yapılan eşlemeler manuel olarak üretilen verilerle değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre test alanları (Vaihingen, Hannover, Dorsten) için sırasıyla %94, %92 ve %95 doğru eşleme seviyelerine ulaşılmıştır (Tablo 1). Test alanlarında birbirlerinden çok farklı özellikte yapılar bulunmasına rağmen, çok yakın doğruluk seviyelerine ulaşılması geliştirilen yaklaşımın görüntü eşleme açısından başarısını ve sağlamlığını ortaya koymaktadır. Yanlış eşleme sonuçları incelendiğinde en çok yanlış eşleme oranı (%8) Hannover stereo çiftinde gözlenmektedir. Bunun temel nedeni ise Hannover görüntüsünün analog kamera ile çekilip tarama işleminden geçirilmesi sonucunda test edilen diğer dijital görüntülere nazaran görüntü kalitesinin düşük seviyede kalması ve görüntüde meydana gelen aşırı gürültü değerleridir. Dolayısıyla, bu görüntüden elde edilen doğrusal çizgilerin kalitesi diğer görüntülerden elde edilen doğrusal çizgilerin kalitesiyle karşılaştırıldığında hem geometrik hem de radyometrik açıdan problemli olmaktadır.

Diğer yandan, Vaihingen bölgesinde geri-çatım işlemi sonunda üç boyutlu olarak elde edilen doğrusal çizgiler, test alanının 3.4 cm doğrulukla (Haala, 2009) elde edilmiş referans LIDAR nokta kümesi verisi kullanılarak üç boyutlu olarak karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma işlemi sırasında toplam 60 adet üç boyutlu çizgi rastgele olarak seçilmiş ve bu çizgilerin obje uzayında yakınına düşen LIDAR nokta verilerinden otomatik olarak referans düzlem geometrileri hesaplanmıştır. Bu işlem sırasında bir çizginin her iki yanında farklı düzlemler olabileceği gibi sadece bir yanında da düzlem bulunabilmektedir. Bu iki durum için değerler ayrı ayrı hesaplanmış ve aynı zamanda toplam RMS hata değeri de ayrıca verilmiştir (Tablo 2). Karşılaştırma sonucunda elde edilen sonuçlara göre, 59 üç boyutlu çizgi ve 97 düzlem arasındaki toplam RMS hata değeri 13.6 cm (1.7 piksel) olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç üzerinde havai nirengi işlemi hatası, doğrusal çizgilerin çıkarılması sırasındaki hatalar, epipolar doğrultusuna yakınlık hataları gibi çok çeşitli hata kaynakları birikmiş ve katlanmış olarak bulunmaktadır.

Bununla beraber kullanılan referans verisinin içerdiği hata değeri (3.4 cm) ve kullanılan görüntünün çözünürlük değerinin 8 cm olduğu düşünüldüğünde üretilen üç boyutlu doğrusal çizgilerin hassasiyet değerinin hedeflenen seviyeyi rahatlıkla yakaladığı görülmektedir. Görüntü eşleme ve doğruluk analizleri sonucunda elde edilen sonuçlar beraber olarak ele alındığında, bu çalışmada stereo görüntülerden doğrusal çizgilerin otomatik geri-çatımı için üretilen yaklaşımın oldukça başarılı ve sağlam olduğu anlaşılmaktadır.



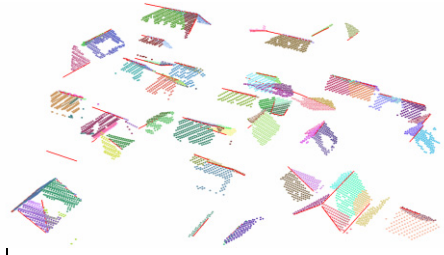
Şekil 7. Test alanları (soldan sağa, Vaihingen-Hannover-Dorsten) ve geliştirilen yaklaşım sonucunda üretilen üç boyutlu çizgiler.

Tablo 1. Geliştirilen yaklaşım sonucunda elde edilen doğrusal çizgi eşleme performansları

Test Alanı	Görüntüden Elde Edilen Toplam Doğrusal Çizgi Sayısı		Eşleme Sonuçları		
	Sol	Sağ	Toplam	Doğru	Yanlış
Vaihingen	1726	1875	963	909 (%94)	54 (%6)
Hannover	2339	2369	1038	954 (%92)	84 (%8)
Dorsten	2724	2764	1598	1516 (%95)	82 (%5)

Tablo 2. Vaihingen test alanı için geri-çatım sonucunda elde edilen üç boyutlu çizgilerin doğruluk analiz sonuçları

Düzlem Komşuluk Sayısı	Toplam Sayı		RMS Hata	
	Çizgi	Düzlem	cm	piksel
1-düzlem komşuluğu	21	21	12.7	1.59
2-düzlem komşuluğu	38	76	13.9	1.74
Düzlem bulunamayan	1	-	-	-
Toplam	60	97	13.6	1.70



4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada ultra yüksek çözünürlüklü (6 – 8 cm) hava fotoğraflarından bina ve yol gibi doğrusal ağırlıklı ana coğrafi detayların otomatik olarak üretilmesinde kullanılabilecek üç boyutlu doğrusal kenarların üretilmesi için yeni bir yaklaşım geliştirilmiştir. Geliştirilen yaklaşımın literatüre katkısını özetlemek gerekirse;

- Kenar bulma algoritmasında kullanılan tüm yöntemler hava fotoğraflarının doğasında var olan çok-bant bilgisini kullanmakta ve böylece görüntülerde çok az bir renk farkı bulunan kısımlar arasındaki kenarlar bile sağlıklı bir şekilde çıkarılabilmektedir.
- Geliştirilen doğrusal kenar bulma metodolojisi sayesinde test alanında aşırı sayıda kenar bulunması durumunda bile sağlam ve güvenilir doğrusal kenar bilgileri üretilebilmekte ve böylece bina vb. nesnelerin detay objelerine dahi odaklanmak mümkün olabilmektedir.

- Stereo görüntülerden elde edilen doğrusal çizgiler yeni bir çift-tabanlı yöntem geliştirilerek eşleştirilmiştir. Literatürde doğrusal çizgilerin eşleştirilmesi için daha önce tanımlanmış olan geometrik ve fotometrik koşullar geliştirilmiş ve bunlara ek olarak üç adet yeni koşul (epipolar, korelasyon ve spatiogram) üretilmiştir. Çift-tabanlı eşlemeler ağırlıklı benzerlik kriterine göre belirlenmiş ve oluşması muhtemel birebir benzeşme problemleri yeni bir olasılık çıkarımı yöntemi ile çözülmüştür.
- Yöntemin çalıştırılabilmesi amacıyla tamamıyla bağımsız ve aynı zamanda grafiksel ara yüz destekli olarak çalışan bir yazılım geliştirilmiştir.

Geliştirilen yaklaşımın testleri farklı derecelerde yoğunluk ve yapılar içeren üç test alanında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen tüm sonuçlar beraber olarak ele alındığında, bu çalışmada stereo görüntülerden doğrusal nesnelere otomatik geri-çatımı için geliştirilen yaklaşımın yoğun ve karmaşık alanlarda bile oldukça başarılı ve sağlam olduğu anlaşılmaktadır. 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 veri seti Alman Fotogrametri ve Uzaktan Algılama Birliği (DGPF) tarafından sağlanmıştır (<http://www.ifp.unistuttgart.de/dgpf/DKEP-Allg.html>).

KAYNAKLAR

- Bailard, C., Dissard, O.,** 2000, A stereo matching algorithm for urban digital elevation models. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66(9), pp. 1119-1128.
- Bay, H., Tuytelaars, T., Van Gool, L.,** 2006, SURF: speeded up robust features, European Conference Computer Vision.
- Belongie, S., Malik, J., Puzicha, J.,** 2002, Shape matching and object recognition using shape contexts. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 24(4), pp. 509-522.
- Collins, R. T., Jaynes, C. O., Cheng, Y. Q., Wang, X., Stolle, F., Riseman, E. M., Hanson, A. R.,** 1998, The ascender system: automated site modeling from multiple aerial images. *Computer Vision and Image Understanding*, 72(2), pp. 143-162.
- Cramer, M., Haala, N.,** 2009, DGPF Project: Evaluation of digital photogrammetric aerial based imaging systems – overview and results from the pilot centre. *IAPRS XXXVIII (1-4-7/W5)*, CD-ROM.
- Fischer, M. Bolles, R.,** 1981, Random sample consensus: a paradigm to model fitting with applications to image analysis and automated cartography, *CACM* 24 (6), pp. 381–395.
- Haala, N.,** 2009, Come back of digital image matching. Photogrammetric Week, Stuttgart, Germany.
- Habib, A. F., Zhai, R., Kim, C.,** 2010, Generation of complex polyhedral building models by integrating stereo-aerial imagery and LIDAR data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 76(5), pp. 609–623.
- Henricsson, O.,** 1998, The role of color attributes and similarity grouping in 3-d building reconstruction. *Computer Vision and Image Understanding*, 72(2), pp. 163-184.
- Jung, F., Paparoditis N.,** 2003, Extracting 3D free-form surface boundaries of man-made objects from multiple calibrated images: a robust, accurate and high resolving power edgel matching and chaining approach. *IAPRS*, 34 (Part 3/W8).
- Kim, Z., Nevatia, R.,** 2004, Automatic description of complex buildings from multiple images, *Computer Vision and Image Understanding*, 96(1), pp. 60-95.
- Lee, Y., Koo, H., Jeong, C.,** 2006, A straight line detection using principal component analysis, *Pattern Recognition Letters*, 27, 1744-1754.
- Lowe, D.G.,** 2004, Distinctive image features from scale invariant keypoints, *International Journal of Computer Vision*, 20(2), pp. 91-110.
- Manual of Photogrammetry (5th ed.),** 2004. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, MA.
- Meucci, A.,** 2005, *Risk and Asset Allocation*, Springer, pp. 209 – 229.
- Mikolajczyk, K., Schmid, C.,** 2005, A performance evaluation of local descriptors, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 27(10), pp. 1615-1630.
- Noronha, S., Nevatia, R.,** 2001, Detection and modeling of buildings from multiple aerial images, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 23(5), pp. 501-518.
- Ó Conaire, C., O'Connor, N. E., Smeaton, A. F.,** 2007, An improved spatiogram similarity measure for robust object localisation. *ICASSP*, Hawaii.
- Park, S., Lee, K., Lee, S.,** 2000, A line feature matching technique based on an eigenvector approach, *Computer Vision and Image Understanding*, 77, pp. 263-283.

- Schenk, T.**, 1999, *Digital Photogrammetry, Volume I* (TerraScienze, Laurelville, OH).
- Schmid, C. Zisserman, A.**, 1997, Automatic line matching across views. *Proceedings of CVPR*, pp. 666–671.
- Scholze, S., Moons, T., Ade, F., Van Gool, L.**, 2000, Exploiting color for edge extraction and line segment stereo matching. *IAPRS*, 815–822.
- Suveg, I., Vosselman, G.**, 2004, Reconstruction of 3D building models from aerial images and maps, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 58, pp. 202-224.
- Taillandier F., Deriche, R.**, 2004, Automatic buildings reconstruction from aerial images: a generic bayesian framework. *IAPRS*, 35 (Part 3A).
- Weickert, J.**, 1997, A review of nonlinear diffusion filtering, *Scale Space Theory in Computer Vision, Lecture Notes in Computer Science*, vol. 1252, Springer, pp. 3-28.
- Weijer, J., Gevers, T., Bagdanov, A.D.**, 2006a, Boosting color saliency in image feature detection, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 28(1) pp. 150-156.
- Weijer, J., Gevers, T., Smeulders, A.W.M.**, 2006b, Robust photometric invariant features from the color tensor, *IEEE Transactions on Image Processing*, 15(1) pp. 118-127.
- Yip, R. K. K., Ho, W. P.**, 1996, Multi-level based stereo line matching with structural information using dynamic programming, *International Conference on Image Processing*, 2, pp. 341-344.
- Zhang, C., Baltsavias, E. P.**, 2000, Edge matching and 3D road reconstruction using knowledge-based methods, *Schriftenreihe der Fachrichtung Geodaesie*, 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.
- Zuliani, M., Kenney, C. S., Manjunath, B. S.**, 2005, The multiransac algorithm and its application to detect planar homographies, *Proc. IEEE International Conference on Image Processing*, Genova, Italy.