FOTOGRAMETRİK GÖRÜNTÜLERİN OTOMATİK EŞLEŞTİRİLMESİ VE SEYREK NOKTA BULUTU OLUŞTURMA

Cihan Altuntaș^{a, *}

^a Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, 42075 Selçuklu Konya, Türkiye – caltuntas@ktun.edu.tr

ANAHTAR KELİMELER: Fotogrametri, SfM Algoritması, Seyrek Nokta Bulutu, Otomatik Görüntü Eşleme, Yerel Özellik Noktası

ÖZET:

Görüntü işleme ve bilgisayar teknolojisindeki hızlı gelişmeler, görüntüye dayalı uygulamalarda otomasyonu da beraberinde getirmiştir. Yerel özellik tanımlayıcı görüntü eşleme operatörleri ile fotoğraf üzerinde belirli özellikleri taşıyan karakteristik noktalar tespit edilebilmektedir. Stereo görüntülerden tespit edilen yerel özellik noktaları eşlenerek fotogrametrik değerlendirme için gerekli bağ noktaları oluşturulmaktadır. Karşılıklı görüntülerdeki yerel özellik noktaları bunların benzerlik ilişkisi kurularak otomatik olarak eşleştirilmektedir. Yerel özellik noktaları görüntüler arasındaki ölçek, bakış açısı, aydınlanma ve renk değerlerinden bağımsız olarak eşleştirilmektedir. Yerel özellik noktaları tespit edilerek eşleştirilmiştir. Baz/yükseklik oranı arttıkça eşlenik nokta sayısı azalmıştır. b/h=1.5 değerinin üzerine çıkıldığında bu operatörlerin eşleme yapamadıkları görünlüştür. Diğer yandan görüntüler arasındaki ölçek farkının üç kat dan fazla olması durumunda eşleme yapılamamıştır. SIFT, diğerlerinden farklı olarak ölçek farkı biraz daha fazla olan görüntüleri eşleybilmiştir. ASIFT ve SURF yöntemlerine göre daha fazla sayıda eşlenik nokta tespit hızları özellikle mobil uygulamalar için önemlidir. SURF yönteminin diğer yöntemlere göre daha hızlı olduğu tespit edilmiştir.

AUTOMATIC MATCHING OF PHOTOGRAMMETRIC IMAGES AND SPARSE POINT CLOUD GENERATION

KEY WORDS: Photogrammetry, SfM Algorithm, Sparse Point Cloud, Automatic Image Matching, Keypoint

ABSTRACT:

Fast developing on image processing and computer technology have been generated automatization on image based applications. Characteristic points that have particular specifications on the images are detected by the keypoint detectors. The matched keypoints from the stereo images create tie points for photogrammetric evaluation of stereo images. The keypoints from overlapping stereo images are matched automaticaly with similarity relations between them independent from the scale, perspective, lighting and brightening variation between the images. In this study, stereo images, that has varying ratio of base/height and scale, had been matched by the keypoints of SIFT, ASIFT and SURF operators. The matched keypoints are decreased when increasing the ratio of base/height. These three operators could not match the images that have bigger base/height ratio than 1.5, and scale variations of three times. SIFT with the difference to the others can match the images that have a little big scale difference. ASIFT has more matched keypoints than SIFT and SURF operators. The keypoint detection and matching time is especially important for simultaneous localization and mapping (SLAM) applications. The SURF is faster than the others in performing these tasks.

1. GİRİŞ

Bütün sektörlerde üretim süreçlerinin olabildiğince otomasyona evrildiği günümüzde, fotogrametrik nokta üretiminin bundan etkilenmemesi mümkün değildir. Uluslararası Fotogrametri ve uzaktan algılama birliği (ISPRS) çatısı altında gerçekleştirilen çalışmaların nihai hedefi de fotoğraflardan ve uydu görüntülerinden bilgi çıkarımının otomasyonudur. Bu amaçla bilgisayar ve görüntü işleme teknolojisindeki pek çok yenilik fotogrametrik işlem adımlarına uygulanmış ve fotogrametrik nokta üretiminde büyük ölçüde otomasyon sağlanmıştır. Digital görüntüleme tekniğinin fotogramtriye getirdiği yeniliklerden sonra görüntü işleme ve bilgisayar tekniklerinin fotogrametrik üretim aşamalarının otomasyonuna katkısı tarihsel gelişim içerisinde çok önemli bir aşamadır. Fotogrametri, gerek topoğrafik gerekse cisim modelleme amaçlı ölçmelerde saha çalışmasını azaltan ölçme işlerinin daha çok ofis çalışmaları ile gerçekleştirildiği düşük maliyetli yüksek doğrulukta bir ölçme tekniğidir. Otomasyon sayesinde ise fotogrametrik üretim için gerekli teknik bilgi donanımı ihtiyacı oldukça azalmıştır. Bu sayede fotogrametrinin uygulama alanları da artmış ve üç boyutlu konum bilgisi gerektiren her alanda uygulanır olmuştur. Ancak sonuçların yorumlanması, analizi ve farklı tekniklerin uygulanabilmesi için işlem adımlarına ait teknik detaylara hakim olunması önemlidir.

Görüntü eşleme, aynı yerin farklı bakış açıları ile elde edilen fotoğrafları arasında eşlenik noktalar oluşturma işlemidir ve

kamera kalibrasyonu, fotogrametrik değerlendirme ve üç boyutlu modellemede aşılması gereken önemli bir işlem adımıdır. Fotogrametrik değerlendirmede stereo görüntüler arasındaki ilişkinin kurulması ile aynı noktalara ait görüntü ışınlarının tek bir noktada kesişmesi sağlanır ve üç boyutlu ölçme gerçekleştirilir. Görüntüler arasındaki bu ilişkinin kurulması eşlenik noktalar ile olur. Her iki görüntüde yeterli sayıda aynı detay noktaları eşleştirilerek stereo görüntüler arasındaki geometrik iliski kurulur. Görüntüler arasındaki geometrik iliski bunların birbirlerine göre cekildikleri andaki konumlarına getirilmesi yani homolog ışınların kesiştirilmesini ifade eder. Görüntülerin otomatik eşleştirilmesinde her iki görüntüden yerel özellik noktaları tespit edilmekte ve bunlar benzerlik ilişkisi kurularak eşleştirilmektedir. Eşleştirilen yerel özellik noktaları ile elde edilen fotogrametrik ölçme noktalarının oluşturduğu görüntüye seyrek nokta bulutu denir. Yani, yerel özellik noktaları ile görüntüler eşleştirildikten sonra ölçme alanını temsil eden homojen olmayan seyrek nokta bulutu görüntüsü elde edilmiş olur.

Görüntü eşleme operatörleri, görüntüler arasındaki ölçek, dönüklük, bakış açısı ve görüntü netliği gibi kriterlere bağlı olmaksızın fotogrametrik görüntülerin otomatik olarak eşlenmesini sağlar. Görüntü eşlemede kullanılan yöntemlerin tarihi gelişimi Jazayeri ve Fraser (2010) da verilmiştir. Aynı çalışmada Förstner, SUSAN ve FAST yöntemleri detaylı olarak incelenmiş ve konumlandırma doğruluğu (accuracy of localization), eşlenik nokta sayıları ve hızları karşılaştırılmış ve FAST operatörü en iyi yöntem olarak değerlendirilmiştir. Barazetti vd. (2010) ve Barazetti (2011) de SIFT ve SURF görüntü eşleme teknikleri ile çoklu görüntüler eşleştirilerek yöneltmesi yapılmış ve nokta bulutu üretilmiştir. Görüntü setinden keypoint noktaları çıkarıldıktan sonra detay noktaları eşleştirilerek görüntüleri sıralanış düzeni elde edilmiştir. Elde edilen esleme ile 151n demetler dengelemesi yapılmış ve hesaplanan değerler ön bilgi olarak kullanılmıştır. Daha sonra en küçük kareler yöntemi ile noktaların eşleşme durumları iyileştirilmiş ve ışın demetleri tekrar uygulanmıştır. Sonuçta en kücük kareler ivilestirmesinin ısın demetleri hesabında bir miktar iyileşme sağladığı görülmüştür. Giang vd. (2018) de otomatik eşleştirilen noktalarla fotogrametrik değerlendirmesi yapılan görüntü setinde, uygulanan yöntem ile eşlenik noktaların konumları iyileştirilmiş ve fotogrametrik değerlendirme doğruluğu artırılmıştır. Diğer bir çalışmada kamera ile alınan fotoğrafın lazer tarayıcı nokta bulutuna göre konumu SIFT yöntemi ile oluşturulan eşlenik noktalarla hesaplanmıştır (Aquilera vd., 2009). Benzer bir çalışmada yersel lazer tarayıcı ölçülerinin birleştirilmesi yansıma görüntülerinin otomatik eşleştirilmesi ile gerçekleştirilmiştir (Altuntas, 2014). Bu eşleştirmede hatalı eşelenen noktaların tespiti Fundamental (F) matris yöntemi ile yapılmıştır. Altuntas (2013) ve Remondino ve Ressl (2006) da fotogrametrik değerlendirmede SIFT ve SURF operatörleri ile tespit edilen yerel özellik noktaları kullanılmış ve detay noktalarında oluşan ölçü hataları incelenmiştir. Farklı alım uzaklıkları ve baz mesafelerine sahip görüntüler otomatik olarak eşleştirilerek fotogrametrik değerlendirmesi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar manuel eşlenik nokta seçimi ile karşılaştırılmıştır.

Labe ve Förstner (2006), Wei vd., (2008) ve Roth (2004) de jeomorfolojik görüntülerden eşlenik noktalar SIFT ile çıkarıldıktan sonra hatalı eşlenik noktalar RANSAC ile tespit edilmiştir. RANSAC ile seçilen nokta setinden F matris hesaplanmış ve hatalı noktalar elemine edilmiştir. Cao vd. (2009) de hava fotoğraflarının fotogrametrik karşılıklı yöneltmesi için SIFT ile eşlenik noktalar bulunmuş ve bu noktalar ile düşey paralakslar giderilerek resimlerin karşılıklı yöneltmesi yapılmıştır. Daha fazla görüntünün aynı anda değerlendirilebilmesi için gerekli ilk yöneltme parametrelerinin bu noktalarla hesaplanabileceği ve yüksek hassasiyet için SIFT ile eşlenen noktalarda en küçük kareler yöntemi ile hassas eşleme yapılması gerektiği belirtilmiştir. SIFT ve SURF operatörleri ve bunların farklı uygulamaları Bauer vd. (2007) tarafından karşılaştırılmıştır. Bu iki yöntem farklı dönüklük, ölçek, gürültü, parlaklık ve bakış açılarına sahip görüntü setlerine uvgulanarak performansları karılaştırılmış ve SIFT operatörünün daha fazla sayıda noktayı doğru olarak eşlediği belirtilmiştir. Kim (2008), eşlenik görüntülerden Harris ve SIFT ile detay noktaları çıkararak RANSAC ile eşleştirmiş ve kamera parametrelerini hesaplamıştır. Yerel özellik noktası tespiti için BRIEF yöntemi Calonder (2010) tarafından geliştirilmiş ve farklı görüntü setleri için SIFT ve SURF ile karşılaştırmaları yapılmıştır. BRIEF operatörü daha hızlı ve daha az bellek gereksinimi ile eşleştirme yapabilmektedir.

Bu çalışmada farklı baz/yükseklik oranı ve resim ölçeğine sahip görüntüler SIFT, ASIFT ve SURF operatörleri ile tespit edilen yerel özellik noktaları kullanılarak otomatik eşleştirilmiştir. Eşleme yöntemlerinin nokta sayısı ve nokta eşleme doğruluk oranları araştırılmıştır.

2. YÖNTEMLER

2.1 SfM Algoritması

Ardısık görüntülerden verel özellik noktalarının tespiti. tanımlanması, konumlandırılması ve eşleştirilmesi ile görüntüler arasındaki ilişki kurulmuş olur. Buna dayalı olarak tanımlı bir koordinat sisteminde kamera konumları, eşlenik noktaların koordinatları ve kamera kalibrasyon parametreleri ışın demetleri dengelemesi ile iteratif olarak hesaplanır. Bütün bu işlem adımlarının tamamı SfM (Structure from Motion) algoritması olarak ifade edilir (Şekil 1). Diğer bir ifade ile SfM, fotogrametrik görüntülerden detay noktalarının otomatik olarak tespiti, konumlandırılması, eşleştirilmesi ve kamera konumları, eşlenik nokta koordinatları ve kamera kalibrasyon parametrelerinin iteratif olarak ışın demetleri dengelemesi ile hesaplanması işlemlerini ifade eder. Tanımdan da anlaşılacağı üzere kamera kalibrasyon bilgileri olamadan da görüntüler eşleştirilebilmekte ve nokta konumları hesaplanabilmektedir. Farklı bakış açılarına sahip her türlü kamera görüntüsü bu şekilde eşleştirilebilmektedir.

SfM algoritması ile gerçekleştirilen bu işlemlerden sonra fotogrametrik görüntüler arasında daha fazla eşlenik nokta oluşturularak yoğun nokta bulutu elde edilir. Bu manada bu işlemlerin tamamının SfM fotogrametrisi olarak da adlandırıldığı olmaktadır. Ancak fotogrametri disiplininin uluslararası çatı kuruluşu bu isimlendirmeyi çok uygun görmemektedir (Fraser, 2017). SfM algoritmasını içeren bu işlemler daha başka isimlerle de (computer vision photogrammetry, multiview photogrammetry, dense image matching, dense point cloud vb.) ifade edilmektedir. Ancak henüz kabul görmüş ortak bir tanımlama yapılmamıştır. SfM algoritmasını da içeren fotoğraftan yoğun nokta bulutu oluşturma işlemi Türkçe bir karşılık olarak "otomatik fotogrametri", "fotogrametrik nokta bulutu", "fotoğraftan yoğun nokta bulutu" olarak isimlendirilebilir.





2.2 SIFT Operatörü

SIFT (Scale Invariant Feature Transform) operatörü yerel özellik noktalarını 128 boyutlu bir özellik vektörü ile temsil eder. Yerel özellik noktalarının tespitinde temel işlemler dört adımda gerçekleştirilir (Lowe, 2004).

- 1. Ekstrem nokta tespiti: Görüntüye uygulanan çok sayıda ölçek değeri için Gauss fonksiyonu farkları hesaplanarak ölçek ve dönüklükten etkilenmeyen görüntü noktaları tespit edilir.
- Özellik noktası tespiti: Tespit edilen olası her detay noktası konum ve ölçek tespiti için ayrıntılı bir model ile tanımlanır. Ölçek ve konumlandırmaya duyarlığı az olan noktalar tespit edilir.
- 3. Yöneltme: Yerel özellik değişim doğrultusuna göre, her özellik noktası bir yada daha fazla sayıda yöneltme parametresi ile tanımlanır. Her özellik noktası için tanımlanan yöneltme, ölçek ve konum bilgileri aynı görüntü üzerindeki diğer tüm özellik noktaları için de uygulanarak bu değerlerin tanımlanan noktalar için değişmez ve belirleyici olduğu test edilir.
- 4. Özellik tanımlama: Her özellik noktasının etrafında belirli büyüklükte bir bölgede seçilen ölçek için yerel görüntü değişimleri belirlenir. Bu değerler nokta civarındaki aydınlanma ve yerel görüntü distorsiyonu

karakteristik seviyelerini temsil eden değerlere dönüştürülür.

2.3 ASIFT Operatörü

ASIFT (Affine-SIFT) operatörü Affin yöntemi ile görüntülerin karşılaştırılmasını içerir ve SIFT operatörünün modifiye edilmiş halidir. Ölçek değişimi nedeniyle oluşan görüntü netliği SIFT operatöründe dikkate alınmaz. Oysa ASIFT kamera optik ekseni bakış doğrultusunun değişmesi nedeniyle oluşan görüntü distorsiyonlarını da yeterli doğrulukta temsil eder. ASIFT, SIFT operatörüne ek olarak görüntüler arasındaki ilişkilerin tanımlanmasında ölçek, yükselti (latitude) ve kayıklık (longitude) değerlerini de kullanır. Büyük miktarda Affin distorsiyonuna sahip görüntülerden dahi yerel özellik noktaları yüksek doğrulukla tespit edilir. ASIFT ile yerel özellik noktalarının tespiti başlıca üç aşamada gerçekleştirilir (Yu ve Morel, 2011).

- Kamera eksenlerinin dönüklüğü nedeniyle oluşan lineer görüntü distorsiyonları belirlenir. Bu distorsiyonlar kamera izdüşüm merkezlerinin bağıl yükselti ve kayıklık değerlerine bağlıdır.
- 2. Görüntüler arasındaki döndürme ve öteleme değerleri hesaplanır.
- 3. Bütün görüntüler belirleyici özellikleri ile karşılaştırılarak eşleştirilir. Görüntü noktalarının eşleştirilmesinde RANSAC (Fischler ve Bolles, 1981) yerine, görüntüler arasındaki perspektif distorsiyon etkisininde dikkate alındığı için ORSA (Moisan ve Stival, 2004) yöntemi kullanılarak daha yüksek doğrulukta eşleşme sağlanır.

2.4 SURF Operatörü

SURF (Speeded Up Robust Features) operatörü, SIFT yöntemine benzer şekilde detay noktalarını tanımlar. Her detay noktası 64 boyutlu bir özellik vektörü ile tanımlanır. SURF özellik noktaları ileri uygulamalar için 128 boyutlu olarak da tanımlanabilir. SURF operatörü ile yerel özellik noktalarının tespitinde temel işlem adımları şunlardır (Bay vd., 2006; Rodriguez vd., 2018):

- Hesaplama süresini kısaltmak için Gauss fonksiyonu (Lowe, 2004) yerine FAST Hessian matrisi (Mikolajczyk ve Schmid, 2001) kullanılarak ekstrem noktalar tespit edilir. Konum ve ölçek parametrelerine göre özellik noktalarının tespiti için Hessian matrisi'nin determinantından yararlanılır. Ardışık olarak Gauss fonksiyonu ile yumuşatılan görüntü piramitleri ile ölçek değişiminden etkilenmeyen özellik noktaları tespit edilir.
- Özellik noktalarını konumlandırmak için Hessian matrisi determinantının maksimum değeri ölçeğe göre enterpole edilerek bulunur.
- Özellik noktaları konumlandırıldıktan sonra her ölçek için daire şeklinde bir alan oluşturan komşu pikseller ile yöneltme elemanları tanımlanır.
- 4. Özellik tanımlama için nokta etrafında kare şeklinde bir bölge tanımlanır. Bu bölge 4x4 boyutlu alt bölgelerden oluşur ve bunlarda yine kare şeklinde alt bölümlerden oluşur. Her bir alt bölge için görüntü değişimlerini ifade eden yatay (d_x) ve düşey (d_y) yönlü değerler (Haar dalga boyu) hesaplanır. Bütün alt bölgelerdeki d_x ve d_y değerleri toplamı ile özellik noktasını tanımlayıcı bir bileşen değerleri elde edilmiş olur.

2.5 Detay Noktalarının Eşleştirilmesi

Kameraların dış yöneltme parametreleri olmaksızın bir detay noktasının eşleniğinin diğer görüntüde bulunması için detay noktalarına ait özellik vektörleri karşılaştırılır. Vektörlerin karşılaştırılmasında quadratic eşleme, ağaç yapısı (kd-tree) yada ORSA (Moisan ve Stival, 2004) yöntemleri kullanılır. Quadratic eşlemede Öklit mesafeleri karşılaştırılır. Öklit mesafesi yerine Mahalanobis mesafesi de kullanılabilir (Fathi ve Brilakis, 2011). *m* ve *n* sayıda özellik noktası içeren iki görüntünün eşleştirmesi şu şekilde yapılır (Barazetti vd. 2010):

- Birinci görüntüde her detay noktasına ait özellik vektörü D_m, ikinci görüntünün her bir detay noktasına ait özellik vektörü D_n ile karşılaştırılır ve karşılıklı görüntülere ait özellik noktaları arasındaki Öklit mesafeleri hesaplanır. d_{mm}=|D_m-D_n|
- 2. Hesaplanan d_{mn} mesafeleri küçükten $(d_{mn})^1$ büyüğe $(d_{mn})^n$ doğru sıralanır.
- Eğer (d_{mn})¹/(d_{mn})² <t ise kısa Öklit mesafesine sahip nokta birinci görüntüdeki detay noktasının ikinci görüntüdeki eşleniği olarak belirlenir.

Burada t eşik değeridir ve genellikle 0.6-0.8 arasında bir değer olarak alınır. kd-tree yönteminde yalnız Öklit mesafeleri değil başka özelliklerde karşılaştırılarak ağaç yapısı oluşturulur. Quadratic yönteme göre daha hızlıdır.

2.6 Hatalı Eşlenen Noktaların Temizlenmesi

Karşılıklı görüntülerden detay noktalarının eşleştirilmesinde çok az sayıda da olsa hatalı eşlenmiş noktalar bulunacaktır. Hatalı eşlenmiş noktaların elemine edilmesinde RANSAC, Least Median of Squares (Rousseeuw ve Leroy, 1987) ve MAPSAC (Torr, 2002) yöntemleri kullanılır. Eşlenik nokta setinin belirli sayıda bir alt kümesi seçilerek bu noktalarla hatalı eşlenik noktalar araştırılır. Alt kümenin eleman sayısı kullanılan eşleştirme yönteminde olabilecek hatalı nokta sayısından fazla olacak şekilde belirlenir.

RANSAC yönteminde seçilen nokta kümesinde her eşlenik nokta kombinasyonu ile F matris hesaplanarak epipolar geometri koşulunu sağlayıp sağlamadıkları kontrol edilir. Fmatris epipolar geometrinin aritmetik ifadesidir ve eşlenik iki görüntüye ait kamera bilinmeyenlerini (iç yöneltme elemanları) ve dış yöneltme parametrelerini birlikte temsil eder. Bir eşlenik noktanın, x_i ve x'_i sırasıyla birinci ve ikinci resim koordinatları olmak üzere F matrisinin sekiz noktalı çözümü aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır.

$$x'_{i}x_{j}f_{11} + x'_{j}y_{j}f_{12} + x'_{j}f_{13} + y'_{i}x_{j}f_{21} + y'_{j}y_{j}f_{22} + y'_{j}f_{23} + x_{j}f_{31} + y_{j}f_{32} + f_{33} = 0 \quad (1)$$

Burada; $x_i = [x_i y_i, 1]^T$, $x'_i = [x'_i, y'_i, 1]^T$ dir. Birinci görüntüdeki bir x_i noktası ile bu noktanın ikinci görüntüdeki eşleniği x'_i arasında

$$x_i^{T} F x_i = 0 \tag{2}$$

bağıntısı ile ifade edilen bir ilişki vardır. Buna göre birinci resimdeki x_i noktasının ikinci resimdeki karşılığı $l'_i=Fx_i$ epipolar doğrusu üzerindedir. Aynı şekilde ikinci resimdeki x'_i noktasının birinci resimdeki karşılığı $l_i=F^Tx'_i$ epipolar doğrusu üzerindedir (Şekil 2). Epipolar doğru x_i, x'_i ve bunların karşılık geldiği P cisim noktasının oluşturduğu düzlemin resim düzlemleri ile olan arakesitidir. Bir eşik değer belirlenerek bu eşik değerin altında kalan noktalar için epipolar geometri gerçekleşmiş kabul edilir. En fazla sayıda noktanın epipolar geometriyi sağladığı eşleştirmenin F matrisi doğru kabul edilerek hatalı noktalar ayıklanır.



Şekil 2. Epipolar geometry ve noktaların eşleştirilmesi (Hartley ve Zisserman, 2004).

2.7 Kamera Konumlarının Belirlenmesi

Görüntü setinde ikiden fazla sayıda fotoğraf bulunması durumunda her fotoğraftaki detay noktalarının diğer bütün fotoğraflardaki eşlenikleri araştırılarak fotoğraflar arasındaki ilişki kurulur. Kamera konumları referans sisteme göre yaklaşık olarak belirlenir. Eşlenik noktaların bulunması için gerekli süre görüntü sayısının karesi ile orantılı olarak artar. n adet fotoğraf bulunması durumunda stereo görüntü kombinasyonu $(n^2-n)/2$ olur. Bu nedenle eşlenik noktaların Öklit mesafeleri karşılaştırılarak aranması oldukça uzun sürecektir. Ağaç yapısı (k-d tree) diyagramı ile noktaların eşlenikleri daha kısa sürede bulunur. Fotoğrafların bindirme durumlarına göre kamera konumları bu şekilde belirlendikten sonra ışın demetleri dengelemesi ile tekrarlamalı olarak hassas konum ve dönüklükler hesaplanır. Bina ya da heykel gibi yapıların ölçülmesinde ardışık ilk ve son fotoğraf arasında bindirme olması model deformasyonunu önleyecektir.

2.8 Seyrek Nokta Bulutu

Eşlenik noktalarla görüntüler arasında ilişki kurulduktan sonra fotogrametrik bağıntılar yardımıyla bu noktaların 3B koordinatları seçilen referans sisteme göre hesaplanır. Eşlenik noktaların oluşturduğu bu 3B nokta bulutu görüntüsüne seyrek nokta bulutu denir. Kullanılan ticari yazılımlar her bir görüntüden tespit edilecek detay sayısı ve iki görüntü arasında tesis edilecek en fazla eşlenik nokta sayısı için kullanıcıya kısıtlama seçeneği sunar. Böylece özellikle görüntü sayısının fazla olması durumunda işlem hızı ve hafiza sorunu giderilebilmektedir.

3. ARAŞTIRMA SONUÇLARI

3.1 Baz Yükseklik Oranına Göre Eşleştirme Sonuçları

Uygulama alanı olarak Konya merkez de bulunan Aziziye Cami seçilmiştir. Caminin Doğu cephesine 6.40 m mesafede bir hat belirlenerek bu hat üzerinde farklı baz mesafeleri ile görüntüler kaydedilmiştir. Fotoğraflar Nikon P50 amatör kamera ile 2048x1536 piksel çözünürlükte çekilmiştir (Şekil 3). Kameranın odak uzaklığı 4.521 mm dir. Farklı baz/yükseklik oranlarına sahip stereo görüntülerin SIFT, ASIFT ve SURF yerel özellik detay noktaları ile eşleştirilmesi Tablo 1, Tablo 2 ve Tablo 3' de verilmiştir. Eşlemelerde her görüntüdeki yerel özellik noktasının diğer görüntüdeki eşleniği Öklit mesafeleri karşılaştırılarak bulunmuş ve karşılaştırma kriteri olarak bütün yöntemler için t=0.6 değeri kullanılmıştır. Karşılaştırma yapmak amacıyla SIFT yöntemi detay noktaları t=0.8 değeri ile de eşleştirilmiştir (Tablo 1).



görüntüler.

jontonii no oştoştirininobi (ao rom be o pinson)			
b/h (h= 6.40m)	1.resim detay noktası #	2.resim detay noktası #	t	Eşlenen nokta sayısı#	Doğru eşlenen nokta#	Doğru eşleme oranı%	
0.38	4178	5040	t=0.6	775	706	91.10	
			t=0.8	1140	962	84.38	
0.75	4258	5437	t=0.6	233	206	88.41	
			t=0.8	604	391	64.74	
1.12	4935	6490	t=0.6	93	60	64.52	
			t=0.8	467	169	36.19	
1.50	5156	6335	t=0.6	73	46	63.01	
			t=0.8	402	104	25.87	
1.88	5963	6294	t=0.6	32	0	0	
			t=0.8	361	0	0	

Tablo 1. Farklı baz yükseklik oranına sahip görüntülerin SIFT yöntemi ile eşleştirilmesi (2048x1536 piksel)

Tablo 2. Farklı baz yükseklik oranına sahip görüntülerin ASIFT yöntemi ile eşleştirilmesi (2048x1536 piksel, t=0.6)

b/h	1.resim	2.resim	Eşlenen	Doğru	Doğru
(h=6.40	detay	detay	nokta	eşlenen	eșleme
m)	noktası#	noktası#	sayısı#	nokta#	oranı%
0.38	13065	15421	1329	1315	98.95
0.75	13311	17634	428	420	98.13
1.12	15086	19793	153	148	96.73
1.50	14804	19311	72	66	91.67
1.88	17251	25796	0	-	-

Tablo 3. Farklı baz yükseklik oranına sahip görüntülerin SURF yöntemi ile eşleştirilmesi sonuçları. (2048x1536 piksel, t=0.6)

<u></u>						
b/h	1.resim	2.resim	Eşlenen	Doğru	Doğru	
(h=6.40	detay	detay	nokta	eşlenen	eşleme	
m)	noktası#	noktası#	sayısı#	nokta#	oranı%	
0.38	44181	46051	1459	1306	89.51	
0.75	44624	48255	523	414	79.16	
1.12	47029	49825	259	106	40.93	
1.50	48240	50983	192	44	22.92	
1.88	49220	52395	125	0	0	

RANSAC algoritması kullanılarak eşleştirilen noktalarda epipolar geometri koşulu F matris eşitliği ile kontrol edilmiştir. Epipolar geometri koşulunu sağlamayan eşlenik noktalar elemine edilmiştir. Tablolardaki verilere göre b/h değerleri için eşlenen nokta sayıları ve eşleşme oranları Şekil 4 ve Şekil 5 de verilmiştir.



Şekil 4. Farklı b/h değerlerine göre (yatay) stereo görüntüler arasında doğru eşlenen özellik noktası sayıları (düşey)



Şekil 5. Farklı b/h değerlerine göre (yatay) stereo görüntüler arasında özellik noktalarının doğru eşleşme oranları % (düşey)

Epipolar geometri koşulunu sağlayan doğru eşlenen noktalar için üç boyutlu koordinatlar hesaplanarak seyrek nokta bulutu elde edilmiştir (Şekil 6, Şekil 7).



Şekil 6. b/h=1.12 oranı ile alınan görüntülerin SIFT, ASIFT ve SURF (yukarıdan aşağıya) ile tespit edilen detay noktalarının eşleştirilmesi. Eşleme eşik kriteri t=0.6 dır.



Şekil 7. b/h=1.12 oranı ile alınan görüntülerden SIFT ile tespit edilen detay noktalarının eşleştirilmesi (Şekil 6'da) ile elde edilen seyrek nokta bulutu görüntüsü. Nokta sayısı 60 dır (Tablo 1).



Image1—Image3







Image1—Image4



Image1—Image5





Image1—Image6



Image1—Image7



Şekil 8. Farklı ölçekli stereo görüntülerin SIFT detay noktaları ile eşleştirilmesi (Tablo 4 eşleşmeleri)

	1.resim Ölçek	2.resim Ölçek	Ölçekler oranı	Yöntem	1.resim Detay noktası#	2.resim Detay noktası#	Eşlenen nokta #	Doğru eşlenen nokta#	Doğru eşleme oranı%
Image1- Image2	1150	1416	1.23	SIFT	3179	4144	1072	843	78.63
				ASIFT	15112	17385	2245	2244	99.96
				SURF	51214	49391	2313	1983	85.73
Image1- Image3	1150	1946	1.69	SIFT	3179	6524	522	325	62.26
				ASIFT	15112	22915	534	533	99.81
				SURF	51214	53088	1048	797	76.05
T 1	1150	2477		SIFT	3179	8546	482	255	61.20
Image1-			2.15	ASIFT	15112	28341	468	466	99.57
Image4				SURF	51214	54704	545	361	66.24
Image1- Image5	1150	3008	2.62	SIFT	3179	9095	314	100	31.85
				ASIFT	15112	29617	117	115	98.29
				SURF	51214	55713	384	220	57.29
Image1- Image6	1150	3539	3.08	SIFT	3179	10714	286	54	18.89
				ASIFT	15112	31978	53	51	96.23
				SURF	51214	54896	291	120	41.24
Image1- Image7	1150	4070	3.54	SIFT	3179	12084	254	36	14.17
				ASIFT	15112	31885	0	0	0
				SURF	51214	49001	201	0	0

Tablo 4. Ölçekleri farklı görüntülerin eşleştirilmesi. (Kamera odak uzaklığı f=4.521 mm)

3.2 Resim Ölçekleri Farkının Görüntü Eşlemeye Etkisi

Aziziye cami doğu duvarının dik bir doğrultu boyunca farklı uzaklıklardan görüntüleri çekildi (Şekil 8). Dolayısıyla resim ölçekleri de kamera çekim mesafesine göre farklı olmaktadır. Farklı ölçekli bu görüntülerin eşleştirilmesinden elde edilen sonuçlar Tablo 4, Şekil 9 ve Şekil 10'da görülmektedir.



Şekil 9. Stereo görüntüler arasındaki ölçek farkları (yatay) ve doğru eşlenen özellik noktası sayıları (düşey)



Şekil 10. Stereo görüntüler arasındaki ölçek farkları (yatay) ve özellik noktalarının eşleşme doğrulukları % (düşey)

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARININ TARTIŞILMASI

Görüntü eşlemede en büyük sorun farklı ölçek ve bakış açısına sahip görüntülerin eşlenmesidir. Hava fotogrametrisinde ardışık görüntüler arasında ölçek ve dönüklük değerleri yaklaşık bilinmektedir ve ardışık görüntüler yaklaşık aynı ölçeklidir. Bu nedenle detay noktalarının tespiti ve görüntü eşlemede kullanılan yöntemler yaklaşık aynı ölçekli görüntülerin eşlenmesini ifade eder. Oysa yersel fotogrametride görüntüler arasında bariz dönüklük ve ölçek farkı bulunmaktadır. Bu tür görüntülerin eşlenmesinde yaygın olarak kullanılan operatör SIFT dir. SIFT in zayıf yönlerini gidermek ve işlem hızını artırmak gibi amaçlarla daha sonraki yıllarda değişik versiyonları olan ASIFT, SURF, BRIEF vb. operatörler geliştirilmiştir.

ASIFT yöntemi görüntüler arasındaki perspektif distorsiyonun etkisini de dikkate aldığından tespit edilen yerel özellik noktalarını doğru eşleme oranı oldukça yüksektir. Çünkü daha başlangıçta yerel özellik noktaları tanımlanırken detay noktalarını diğerlerinden ayırt etmeye yarayan Affin distorsiyon parametreleri de dikkate alınmaktadır. SIFT ve ASIFT 128 boyutlu özellik vektörü ile detay noktalarını tanımlar. SURF ise detay noktalarını tanımlamada bazı özellikleri göz ardı ederek 64 boyutlu özellik vektörü ile detay noktalarını tanımlar. Bu nedenle SURF diğerlerine göre oldukça hızlıdır ve mobil uygulamalarda sıklıkla tercih edilir. Diğer yandan SURF özellik vektörü, noktalar için daha az sayıda ayırt edici özelliği temsil ettiğinden eşlenen noktaların hata oranı oldukça yüksektir. Bu olumsuzluğu gidermek için daha ileri uygulamalarda SURF detay noktaları 128 boyutlu özellik vektörü ile de ifade edilebilir.

Bindirmeli görüntülerin, özellik noktalarının Öklit mesafeleri karşılaştırılarak eşlenmesinde karşılaştırma kriterinin (t) büyük seçilmesi durumunda hatalı eşlenen nokta sayısı artmaktadır. SIFT için tespit edilen aynı detay noktalarının t=0.6 ve t=0.8 kriterleri ile eşleştirilmesi sonuçları karşılaştırıldığında bu durum görülmektedir (Tablo 1). Görüntü eşleme uygulamalarında t için farklı değerler de kullanılabilir. Ancak standart olan t=0.6 değeridir.

Araştırma sonuçlarına göre b/h=1.5 dan fazla ise SIFT, ASIFT ve SURF operatörleri detay noktası eşlemede başarısız olmuştur. Diğerlerinden farklı olarak SIFT operatörü b/h=1.88 değerindeki görüntüler için de detay noktalarını eşleştirmiş ancak bu eşleşmelerin hatalı olup olmadığı tespit edilememiştir. Çünkü F matrisini hesaplayacak sayıda doğru eşlenik nokta bulunamamıştır. SIFT yönteminin doğru eşlenen nokta sayısı diğerlerine göre daha düşüktür (Şekil 4). Doğru eşleme oranı en düşük olan ise SURF operatörüdür (Şekil 5). Bütün operatörler için b/h değeri arttıkça eşlenen nokta sayısı azalmaktadır.

Aralarında ölçek farkı olan görüntülerin eşlenmesinde SIFT in diğer operatörlere göre daha başarılı olduğu görülmüştür. ASIFT ve SURF operatörleri iki görüntü arasındaki ölçek farkının 3 kat olması durumuna kadar eşleme yapabilmekte, ölçek farkı fazla olursa başarısız olmaktadır. Ancak SIFT operatörü ölçek farkının 3.54 olması durumunda bile uygulanabilmiştir. Ölçek farkı olan görüntülerin eşlenmesinde de ASIFT operatörünün detay noktalarını doğru eşleme oranı oldukça yüksektir. Bütün operatörler için görüntüler arasındaki ölçek farkı arttıkça eşlenen nokta sayısı azalmaktadır.

Bu sonuçlar göstermektedir ki SfM algoritması, b/h oranı düşük yani bakış açıları birbirine yakın görüntüleri daha yüksek doğrulukla ve yüksek sayıda nokta ile eşlemektedir. Oysa fotogrametride nokta konum doğruluğunun yüksek olması için stereo görüntülerin b/h oranının 1 'e yakın ve biraz büyük olması istenir. Bu durum stereo görüntülerden nokta bulutu oluşturmada dikkate alınmalıdır. Ancak fotoğraflardan nokta bulutu oluşturmada ölçme alanının çok sayıda fotoğrafi kullanılarak oluşturulacak blok model ile nokta doğrulukları yeterli seviyede elde edilebilir. Diğer yandan eşlenik görüntüler arasında geometrik ilişkinin kurulabilmesi yani karşılıklı yöneltme için en az beş eşlenik nokta gerekir. b/h ve ölçek farkı sınırlarının aşılmaması durumunda SfM algoritması görüntüler arasında oldukça fazla sayıda eşlenik nokta tespit edebilmektedir.

Fotogrametrik değerlendirmeden daha yüksek doğruluk elde edebilmek için en küçük kareler (EKK) yöntemi ile eşlenik noktaların konumları iyileştirilebilir. Ancak bunun sonuca etkisi önemsiz derecededir. Çünkü eşlenen nokta sayısı gereğinden oldukça fazladır ve beklenen doğruluğu sağlamaktadır. Diğer yandan EKK yönteminin görüntü noktalarına uygulanabilmesi için görüntüler arasında dönüklüğün 25°, ölçek farkının da %30 dan fazla olmaması gerekir (Barazzetti vd., 2010)

5. SONUÇ

Fotoğraflardan yoğun nokta bulutu oluşturma üç boyutlu ölçme ihtiyacı olan her alanda daha fazla kullanılır hale gelmektedir. Hızlı ve düşük maliyetli bir ölçme yöntemidir. Fotoğraflardan yoğun nokta bulutu oluşturma yazılımları işlem adımlarının büyük bir kısmını kullanıcı müdahalesi olmadan otomatik olarak gerçekleştirmektedir. Bu nedenle yeterli teknik bilgi olmadan fotoğraflardan ve üç boyutlu model oluşturulabilmektedir. Ancak ölçme işleminde sonuçların analizi, yorumlanması ve yüksek doğruluk için SfM algoritmasının bilinmesi önemlidir.

Bu çalışmada değişik b/h ve ölçek değerlerine göre görüntü eşleme operatörlerinin performansları karşılaştırılmış ve sınırları belirlenmiştir. Buna göre SIFT, ASIFT ve SURF operatörleri stereo görüntü eşlemede b/h=1.5 dan daha fazla olması durumunda eşlenik nokta oluşturamamaktadır. Ölçek farkının 3 den büyük olması durumunda ise ASIFT ve SURF ile eşleme yapılamamaktadır. SIFT operatörü için ise ölçek farkı 3.5 kata kadar çıkmaktadır. Bu sınırlar ölçülen yüzey ve görüntü netliği gibi etkilerde dikkate alındığında bir miktar farklılık gösterebilir.

KAYNAKLAR

Altuntas, C., 2014. Pair-wise automatic registration of threedimensional laser scanning data from historical building by created two-dimensional images. Optical Engineering, 53(5), pp. 1-6, doi: 10.1117/1.OE.53.5.053108

Altuntas, C., 2013. Keypoint based automatic image orientation and skew investigation on tie points. Kybernetes, 42(3), pp. 506-520.

Aquilera, D.G., Gonzalvez, P.R. and Lahoz, J.G., 2009. An automatic procedure for co-registration of terrestrial laser scanners and digital cameras. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 64, pp. 308-316.

Barazetti, L., Scaioni, M., Remondino, F. 2010. Orientation and 3D modelling from markerless terrestrial images: Combining accuracy with automated. The Photogrammetric Record, 25(132), pp. 356-381.

Barazetti, L., 2011. Automatic tie point extraction from markerless image blocks in close-range Photogrammetry, Ph.D. Thesis, Politecnico Di Milano.

Bauer, J., Sünderhauf, N., Protzel, P., 2007. Comparing several implementations of two recently published feature detectors. In Proc. of the International Conference on Intelligent and Autonomous Systems, IAV, Toulouse, France.

Bay, H., Tuytelaars, T., Gool, L.V., 2006. SURF: Speeded Up Robust Features. European Conference on Computer Vision, LNCS Vol.3951, pp. 404-417.

Calonder, M., 2010. Robust, high-speed interest point matching for real-time applications, Ph.D. Thesis, Swiss Federal Institute of Technology, Computer Vision Laboratory. EPFL, Lausanne.

Cao, H., Du, Q., Hu, H., Ma, H., 2009. Full automatic relative orientation of unconventional image pairs. IEEE international conference on information engineering and computer science, DOI: 10.1109/ICIECS.2009.5363803, pp. 1-4.

Fathi, H., Brilakis, I., 2011. Automated Sparse 3D Point Cloud Generation of Infrastructure Using Its Distinctive Visual Features. Advanced Engineering Informatics, 25, pp. 760-770.

Fischler, M. A., Bolles, R. C., 1981. Random Sample Consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. Communications of the ACM, 24(6), pp. 381-395.

Fraser, C.S., 2017. Interview on ISPRS TC II Mid-term Symposium, 4–7 June 2018, Riva del Garda, Italy.

Giang, N.T., Muller, J.M., Rupnik, E., Thom, C., Deseilligny, M.P., 2018. Second Iteration of Photogrammetric Processing to Refine Image Orientation with Improved Tie-Points. Sensors, 18, 2150; doi:10.3390/s18072150 Hartley, R. I., Zisserman, A., 2004. Multiple View Geometry in Computer Vision. Second Edition. Cambridge University Press, Cambridge.

Jazayeri, I., Fraser, C.S., 2010. Interest operators for featuredbased matching in close range Photogrammetry. The Photogrammetric Record, 25(129), pp. 24-41.

Kim, J., 2008. Camera parameter estimation for image based modelling. Demo presentation - Visual recognition and search, March 21, http://www.cs.utexas.edu/~grauman/ courses/spring2008/slides/Jaechul-Camera_parameter _____estimation_for_Image_Based __Modeling.pdf (accessed 29th November, 2011).

Labe, T., Förstner, W. 2006. Automatic relative orientation of images. Proceedings of the Fifth Turkish-German Joint Geodetic Days, 29-31 March, Berlin, ISBN 3-9809030-4-4.

Lowe, D., 2004. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. International Journal of Computer Vision, 60(2), pp. 91-110.

Mikolajczyk, K., Schmid, C., 2001. Indexing based on scale invariant interest points. In: ICCV. Vol 1, pp. 525 – 531.

Moisan, L., Stival, B., 2004. A probabilistic criterion to detect rigid point matches between two images and estimate the fundamental matrix. International Journal of Computer Vision, 57(3), pp. 201–218. http://dx.doi.org/10.1023/B:VISI.0000013094.38752.54.

Remondino, F., Ressl, C. 2006. Overview and experiences in automated markerless image orientation, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (IAPRS), Vol. XXXVI Part 3, ISSN 1682-1750.

Rodriguez, M., Delon, J., Morel, J.M., 2018. Fast Affine Invariant Image Matching. Image Processing On Line, 8, pp. 251–281. https://doi.org/10.5201/ipol.2018.225

Roth, G., 2004. Automatic correspondences for photogrammetric model building. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (IAPRS), Volume XXXV Part B5, pp. 713-718.

Torr, P.H.S., 2002. Bayesian model estimation and selection for epipolar geometry and generic manifold fitting. International Journal of Computer Vision, 50(1), pp. 35–61.

Wei, W., Jun, H., Yiping, T., 2008. Image matching for geomorphic measurement based on SIFT and RANSAC methods. IEEE international Conference on Computer Science and Software Engineering, 2, pp. 317-320.

Yu, G., Morel, J.M., 2011. ASIFT: An Algorithm for Fully Affine Invariant Comparison. Image Processing On Line, 1, pp. 11–38. https://doi.org/10.5201/ipol.2011.my-asift