



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



SURF ve RANSAC tabanlı homografi tahmini kullanarak otomatik imaj birleştirme

Automatic image stitching using SURF and RANSAC based homography estimation

Yazar(lar) (Author(s)): Anıl BAŐ¹

ORCID¹: 0000-0002-3833-6023

Bu makaleye řu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Bas A., “SURF ve RANSAC tabanlı homografi tahmini kullanarak otomatik imaj birleştirme”, *Politeknik Dergisi*, 25(2): 597-604, (2022).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.768444

SURF ve RANSAC Tabanlı Homografi Tahmini Kullanarak Otomatik İmaj Birleştirme

Automatic Image Stitching Using SURF and RANSAC Based Homography Estimation

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Görüntülerin yönüne, düzenine ve ölçeğine bağışık tam otomatik bir görüntü birleştirme tekniği / Fully automatic image stitching technique, immune to image orientation, order and scale
- ❖ Gürültüye toleranslı, zorlu koşullar altındaki görüntülerde çalışabilme / Tolerant to noise, works on images under challenging conditions

Grafik Özet (Graphical Abstract)



Şekil. Çakışan imajların önerilen görüntü birleştirme yaklaşımıyla kaydedilmesi, hizalanması ve harmanlanması / **Figure.** Overlapping images are registered, aligned and blended by the proposed image stitching approach

Amaç (Aim)

Çalışma, literatürdeki çalışmaların manuel müdahale gerektirdiği veya zorlu içsel ve dışsal faktörlere maruz kaldığında nispeten kırılğan olduğu görüş alanı sınırlamasına otomatik bir çözüm sunmaktadır. / The study provides an automatic solution to the field-of-view limitation, where studies in the literature require manual initialisation or are relatively fragile when subject to challenging intrinsic and extrinsic factors.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

SURF algoritması ile görüntüler arasında referans noktaları tespitine, RANSAC ve homografi teknikleriyle görüntü hizalamaya ve Poisson yöntemi ile görüntü harmanlamaya dayanmaktadır. / It is based on reference points detection between the images with the SURF algorithm, image alignment with RANSAC and homography techniques, and image blending with the Poisson method.

Özgünlük (Originality)

Önerilen yöntem gürültü ve hatalardan etkilenmemekte, görüntülerin ölçeğinden, yönünden, hizalamasından ve sırasından bağımsız olarak çalışmaktadır. / The proposed method is immune to noise and errors, works independently from the scale, direction, alignment and order of the images.

Bulgular (Findings)

Önerilen yaklaşım farklı veri setleri ve senaryolar üzerinde karşılaştırılmıştır. Deneylerde hem nicel hem de nitel anlamda literatürdeki yöntemlerden daha kaliteli sonuçlar gözlemlenmiştir. / The proposed approach is compared on different datasets and in various scenarios. In the experiments, the proposed method surpasses state-of-the-art methods in both quantitative and qualitative terms.

Sonuç (Conclusion)

Görüntü birleştirme, kontrolsüz görüntülerin karmaşıklığı göz önüne alındığında, çözülmesi zor bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Önerilen yöntem, stereo ve çok açılı kamera uygulamaları, uydu ve sualtı haritalama sistemleri ve tıbbi görüntüleme gibi alanlarda kullanılabilir. / Image stitching emerges as a difficult problem to solve, given the complexity of uncontrolled images. The proposed method can be used in areas such as stereo and multi-angle camera applications, satellite and underwater mapping systems, and medical imaging.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

SURF ve RANSAC Tabanlı Homografi Tahmini Kullanarak Otomatik İmaj Birleştirme

Araştırma Makalesi / Research Article

Anıl BAŞ*

Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Müh. Bölümü, Marmara Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 12.07.2020 ; Kabul/Accepted : 02.11.2020 ; Erken Görünüm/Early View : 24.11.2020)

ÖZ

Bu çalışmada kontrolsüz ortamda çekilen iki boyutlu imajların birleştirilmesi için tam otomatik bir yöntem sunulmaktadır. Özellikle stereo ve çok açılı kamera uygulamaları, uydu ve sualtı haritalama sistemleri, tıbbi görüntüleme gibi alanlarda ihtiyaç duyulan bu yöntem, görüntülerdeki görüş alanı limitasyonuna bir çözüm sunmaktadır. Çalışma, görüntüler arasında bulunan referans noktaların SURF algoritması ile tespiti, bu noktalar üzerinden RANSAC ve homografi teknikleri ile imajların hizalanması ve Poisson yöntemi ile imajların harmanlanmasına dayanmaktadır. Yapılan nicel ve nitel deneyler, önerilen yöntemin diğer yaklaşımlardan daha kaliteli sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: İmaj birleştirme, SURF, RANSAC, homografi, poisson harmanlama.

Automatic Image Stitching Using SURF and RANSAC Based Homography Estimation

ABSTRACT

This study presents a fully automatic method for image stitching on two-dimensional uncontrolled images. It provides a solution to the field-of-view limitation, which is especially needed in areas such as stereo and multi-angle camera applications, satellite and underwater mapping systems, and medical imaging. The study is based on reference points detection between the images with the SURF algorithm, image alignment with RANSAC and homography techniques, and image blending with the Poisson method. The quantitative and qualitative experiments show that the proposed method produces higher quality results than previous approaches.

Keywords: Image stitching, SURF, RANSAC, homography, poisson blending.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Birbiriyle ilişkili ve üst üste binen bölümleri bulunan imajların birleştirilme işlemi, görüntü dikişi (image stitching) olarak adlandırılmaktadır [1]. Süper çözünürlüklü görüntüleme ve panoramik imajlarda kullanılan bu yöntem, görüş alanı (field-of-view) limitasyonuna bir çözüm sunmaktadır. Buradaki temel sorun, herhangi bir görüntü kayıt altına alınırken yaşanan kapsamlı lens, sensor ve kamera açısı eksikliğinden kaynaklanmaktadır. Özellikle tek gözlü kameralardan elde edilen görüntülerde sıkça yaşanan bu durum, imaj birleştirme teknikleriyle aşılmaktadır. İmaj birleştirme teknikleri birden fazla ve birbiriyle ilişkili imajların bulunduğu; stereo ve çok açılı kamera uygulamaları, uydu ve sualtı haritalama sistemleri, tıbbi görüntüleme gibi alanlarda kullanılabilir [2-5].

Bu çalışmada kontrolsüz ortamda çekilen iki boyutlu imajların tam otomatik olarak birleştirilmesi amaçlanmaktadır. Yabanda çekilmiş görüntüler olarak da isimlendirilen imajlar, hareket bulanıklığı, doygunluk, kamera gürültüsü, aydınlatma ve ışık değişiklikleri gibi faktörlerden güçlü bir şekilde etkilenmektedir [6]

İmajlarda bu faktörlere ek olarak, kamera parametreleri, çekim açısı, odak uzaklığı ve görüntünün içeriğine dair

herhangi bir bilgi bulunmamaktadır. İmaj birleştirme işlemi, ilgili görüntülerin karmaşıklığı göz önüne alındığında, çözümü zor bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu faktörlerin tümünü modellemeye çalışan yöntemler genellikle büyük varsayımlarda bulunmakta ve farklı durumlar ile karşılaşıldığında kırılgan kalmaktadır [7].

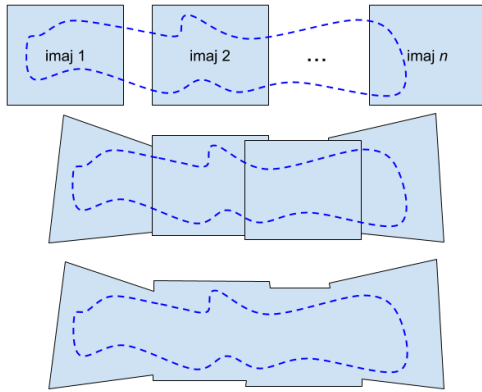
Literatürde konu ile ilgili çalışmalar bulunmakla beraber, oluşturulmaya çalışan panoramik görüntülerde farklı türlerde hatalar gözlenmektedir. Özellikle referans noktası tespiti ve hizalama hatalarından ötürü ortaya çıkan yırtılma veya içeriğin kopyalanması, gölgelenme (ghosting) ve imajların birleştiği noktalarda şeritlerin oluşması sıkça karşılaşılan hatalardır.

Önerilen yaklaşım, bahsi geçen hatalara daha toleranslı olup, elde edilen sonuçlar literatürdeki çalışmalara kıyasla daha yüksek kalitededir. Bununla birlikte yöntem, herhangi bir manuel müdahale (referans noktalarının manuel tespiti, üst üste binen imajların hizalanması gibi) ve girişime (kalibrasyon, ön işleme gibi) ihtiyaç duymamakta, tam otomatik olarak çalışmaktadır. Ayrıca yaklaşım, görüntüler arasındaki referans noktaların özellik tabanlı tespitine dayanmakta, bu nedenle zorlu koşullar altındaki görüntülerde bahsi geçen faktörlerden daha az oranda etkilenmektedir.

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : muhammedtalha.unal@gazi.edu.tr

Çalışmada elde edilen referans noktaları üzerinden rastgele örnekleme ve projektif dönüşüm (homografi) modeli kullanılarak geometrik kestirim yapılmakta, hizalanmış imajlar gradyan tabanlı harmanlama ile birleştirilmektedir. Bu nedenle önerilen yöntem farklı yönlerde ve ölçeklerdeki görüntüleri işleyebilmekte, görüntülerin hizası ve sırasından bağımsız çalışmaktadır. Şekil 1'de imaj birleştirme sürecine yönelik bir genel bakış sunulmuştur.

Makalenin geri kalanı şu şekilde düzenlenmiştir: 2. Kısımda bu alanda yapılmış çalışmalar incelenmiştir. 3. Kısımda kullanılan yöntem detaylı olarak açıklanmıştır. 4. Kısımda elde edilen bulgular ve sonuçlar tartışılmıştır. Son olarak 5. Kısımda çalışma özetlenmiş ve ileri çalışmalara yönelik önerilerde bulunulmuştur.



Şekil 1. İmaj birleştirme işlemine genel bakış. Yukarıdan aşağıya: birden fazla imaj, imajların hizalanması ve projektif dönüşümü, imaj harmanlama (Image stitching process overview. Top-down: multiple images, alignment and projective transformation of images, image blending)

2. LİTERATÜR TARAMASI (LITERATURE REVIEW)

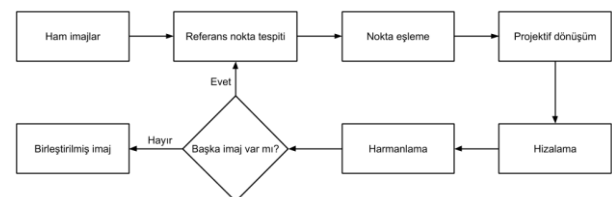
İmaj birleştirmede temel prensipler sabit kalmak kaydıyla işlem basamaklarında farklı algoritmalar kullanılabilir. Bu kısımda ilgili çalışmalar iki başlık altında incelenmektedir.

2.1. Referans Nokta Tespiti ve İmaj Hizalama (Reference Point Detection and Image Alignment)

İmaj birleştirmede ilk adım, imajlar üzerindeki referans noktalarının belirlenmesidir. Buna yönelik olarak önerilen ilk yöntemlerde referans nokta yerine kenar ve köşe noktası teriminin kullanıldığı görülmektedir [1]. Schmid vd. [8] farklı operatörler ile referans noktalarının tespitine dair geniş bir literatürü incelemektedir. Köşe noktası tespitinde sıklıkla kullanılan bir yöntem olarak, Harris köşe detektörü gri tonlamalı olarak aldığı imajın, gradyanı ile birlikte bir yapı tensörü oluşturarak ve bu tensör üzerinden özdeğer [9] çıkarımı yaparak çalışmaktadır [10]. Kang vd. [11] bu yöntemin imaj birleştirmede kullanımını göstermektedir. Mikolajczyk vd. [12] benzer detektörler üzerine kapsamlı bir karşılaştırma ve derleme sunmaktadır. İmajlarda rotasyon ve kaydırmalarda köşe tespiti yapılabilirken

ölçek farklılığının olduğu durumlarda, bir başka deyişle imaj boyutunun değiştiği durumlarda köşe bilgisinin kaybolduğu gözlenmektedir [8]. Ölçekten bağımsız referans nokta tespitine yönelik bir yaklaşım, Lowe'un önerdiği özellik tabanlı (feature-based) SIFT algoritmasıdır [13]. SIFT tekniğinde belirli bir imaja ait ölçek uzayında Gauss farkı (DoG) kullanılarak referans noktaları elde edilmektedir. Wu vd. [14] SIFT ve türevleri üzerine bir derleme sunmaktadır. Bu çalışmada kullanılan nokta tespit tekniği SURF (Speeded-Up Robust Features), SIFT'e benzer yapıda özellik tabanlı olup, integral imajlar ve Hessian matrisi bir tanımlayıcı kullanılmaktadır [15]. Bauer vd. [16] SIFT ve SURF tekniklerini inceleyen çalışmalarında, SIFT algoritmasının daha fazla sayıda anahtar nokta tespit ettiğini ancak farklı imajlar arasında etkin bir şekilde nokta tanıma ve eşleştirmede öne çıkan bir fark olmadığını ve bunun yanında SURF algoritmasının çalışma süresi açısından çok daha hızlı olduğunu belirtmektedir.

Farklı imajlar üzerinde bahsi geçen yöntemler ile referans noktaları elde edildikten sonraki adım, bu noktaların birbiri ile eşlenmesi ve ilgili imajların hizalanması işlemidir. Bu amaçla literatürde en sık kullanılan yöntemler, ilk olarak Fischler ve Bolles [17] tarafından önerilen rastgele örnek konsensüsü (Random Sample Consensus, RANSAC) ve Rousseeuw'un [18] ortaya koyduğu en küçük medyan kareler (Least Median of Squares, LMS) yöntemidir. Bu çalışmada RANSAC temelli bir görüntü analizi gerçekleştirilmiştir. RANSAC algoritması yerine LMS yöntemi de model eşleştirmek için kullanılabilir ancak referans noktaları birbiriyle uyumlu değilse (aykırı noktaların fazla olması durumunda), noktaların medyanı hatalı olacaktır [19]. RANSAC Algoritması ile Homografi Tahmini bölümünde anlatılacağı üzere, çalışmada önerilen sistemde referans noktaları üzerinde rastgele örneklem yapıldığından dolayı oluşabilecek hata oranı en aza indirgenmektedir. Bu teknikler ile eşlenen noktalar üzerinden en küçük kareler yöntemi [20] benzeri bir optimizasyon işlemi ile geometrik dönüşüm matrisi çıkarımı yapılabilir. Bu çalışmada kontrolsüz imajlar üzerinde bir model önerildiğinden dolayı kamera ve dışsal parametreler bilinmemekte (yok sayılmakta) olup, dönüşüm matrisi birbirine karşılık gelen ilişkili noktalar üzerinden tam otomatik olarak hesaplanmaktadır. SURF ve benzeri referans nokta tespit algoritmaları parmak izi tanıma sistemleri [21], otonom araç uygulamaları [22] ve imajlarda sahtecilik tespiti [23] gibi alanlarda kullanılabilirlerdir.



Şekil 2. İmaj birleştirme sürecinin akış şeması (Flowchart of the image stitching process)

2.2. İmaj Harmanlama (Image Blending)

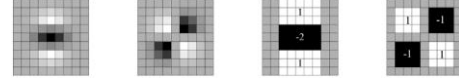
Birbiriyle hizalanmış imajların birleştirilmesinde en son adım ilgili görüntülerin birbiriyle harmanlanması (blending), literatürdeki diğer bir deyişle mozaiklenmesi işlemidir. Porter ve Duff [24] tarafından önerilen Alfa harmanlama tekniği literatürde bu alandaki ilk çalışmalardan biridir. RGB renk uzayına ek olarak Alfa kanalı üzerinde tutulan opallik ve şeffaflık değeri ile üst üste binen piksellerin ağırlıklı renk ortalaması temeline dayanmaktadır. Burt ve Adelson [25] daha sonra Laplace piramidi tabanlı harmanlama yaklaşımını önermişlerdir. İlgili yaklaşımda çoklu ölçeklerdeki ve farklı frekanslardaki görüntülerden elde edilen bilginin kabadan inceye (coarse-to-fine) analiziyle imajlar birleştirmektedir [26]. İmaj birleştirmede çoklu frekans bantları yerine ikili (yüksek ve alçak) bantlar kullanılarak harmanlama yapılabileceği gibi [27], bunun yerine üst üste binen alanlar içinde minimum hata sınırı kesim tekniği [28] uygulanarak da yamalama işlemi gerçekleştirilebilir [29].

Bu çalışmada birbiri ile kesişen imajlara Poisson harmanlama olarak da bilinen gradyan tabanlı bir harmanlama işlemi uygulanmıştır [30]. Poisson Algoritması ile İmaj Harmanlama kısmında detaylı olarak açıklanacak olan bu yöntem; gölge, hata ve gürültü temizleme [31-33], fotomontaj [34] ve yüz transferi [35] gibi görüntü işleme uygulamalarında kullanılmaktadır.

Literatürde belirtilen teknikleri ve yaklaşımları kullanarak imaj birleştirme işlemi yapan çalışmalar mevcuttur. Wang ve Yang [36], bu çalışmalar üzerine bir derleme sunmaktadır. Li vd. [37] perspektif ve projektif bozulmaya yönelik yarı homografi çözgü kullanan bir yaklaşımla panorama oluşturmaktadır. Lin vd. [38] imaj birleştirme kalitesini lokal hizalamayı optimize ederek iteratif olarak iyileştiren bir yöntem sunmaktadır. Jovanovski ve Li'nin [39] patentledikleri imaj birleştirme yöntemi, farklı perspektiflere ait görüntülerden nesne boyutlarını belirlemek amacıyla kullanılabilir. Bu çalışmada önerilen yöntem ile karşılaştırılan APAP [40], SIFT nokta tahmini ve doğrusal harmanlama tabanlı bir yaklaşım sunmaktadır. Benzer şekilde nicel ve nitel değerlendirmede kullanılan AutoStitch [27], çok bantlı frekans harmanlama kullanılmaktadır.

Çizelge 1. Önerilen yöntemin ana adımları (The main steps of the proposed method)

Girdi	:	İmaj listesi, $I_1 \dots I_n$
Adım 1	:	I_j ve I_{j+1} üzerinde referans nokta tespiti
Adım 2	:	Noktalar arasında eşleme ve projektif dönüşüm
Adım 3	:	İmajların birbirine hizalanması
Adım 4	:	Üst üste binen alanların harmanlanması, I_x
Adım 5	:	$I_j = I_x$
Adım 6	:	$j+1 < n$ ise Adım 1'e git
Çıktı	:	Birleştirilmiş İmaj, I_x



Şekil 3. y ve xy yönlü ikinci dereceden kısmi Gauss türevleri ve karşılık gelen kutu filtresi yaklaşımları [15] (Gaussian second order partial derivatives in y and xy direction and corresponding box filter approximations)

3. ÖNERİLEN YÖNTEM (PROPOSED METHOD)

Bu kısımda imaj birleştirmede kullanılan metod ve teknikler detaylı olarak alt bölümler halinde açıklanmıştır. İmaj birleştirme sürecinin akış şeması Şekil 2'de verilmiştir. Çizelge 1, çalışmada önerilen yaklaşımın ana adımlarını sunmaktadır.

3.1. SURF Algoritması ile Referans Noktalarının Tespiti (Reference Points Detection with SURF Algorithm)

İmaj birleştirmede ilk olarak iki görüntü arasında benzerlik ilişkisinin kurulması amacıyla referans noktalar tespit edilmelidir. Referans noktalarının (özellik noktaları) tespiti için farklı algoritmalarından yararlanılabileceği gibi manuel olarak da seçim işlemi gerçekleştirilebilir. Bu çalışmada SURF algoritması [15] kullanılarak otomatik nokta tespiti yapılmıştır. Gri tonlamaya dönüştürülmüş girdi olarak alınan görüntüler Eş. 1 kullanılarak integral imaja çevrilmektedir.

$$I_{\Sigma}(\mathbf{x}) = \sum_{i=0}^{i \leq x} \sum_{j=0}^{j \leq y} I(i, j) \quad (1)$$

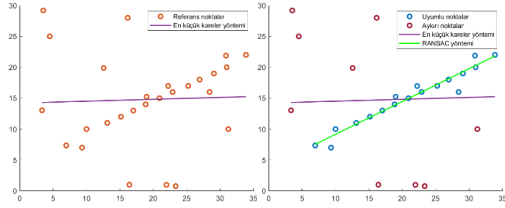
Burada $I_{\Sigma}(\mathbf{x})$, $\mathbf{x} = (x, y)$ piksel noktası olacak şekilde, orijin ve piksel noktası arasında kurulan dikdörtgen bölgedeki piksel değerlerinin toplamını ifade eder. SURF, Hessian matrisi ve görüntü piramitlerine dayalı bir tespit işlemi gerçekleştirmektedir. Bu sayede maliyet (hesaplama süresi) ve performans açısından yüksek seviyede çalışmaktadır. Basitçe, bir pikselin Hessian'ı Eş. 2 kullanılarak hesaplanabilir ve bu matrisin determinantı da Eş. 3 ile elde edilebilir.

$$H(\mathbf{x}, \sigma) = \begin{bmatrix} L_{xx}(\mathbf{x}, \sigma) & L_{xy}(\mathbf{x}, \sigma) \\ L_{xy}(\mathbf{x}, \sigma) & L_{yy}(\mathbf{x}, \sigma) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\det(H_{yak}) = D_{xx}D_{yy} - (wD_{xy})^2 \quad (3)$$



Şekil 4. İmajlar arasında tespit edilen referans noktalar ve bu noktaların birbirleriyle eşleştirilmesi (Reference points detected between images and corresponding matching points)



Şekil 5. En küçük kareler ve RANSAC yöntemlerinin karşılaştırılması. Gözlem kümesinde aykırı noktalar bulunduğu anda RANSAC yöntemi daha doğru bir kestirim vermektedir (Comparison of least squares and RANSAC methods. The RANSAC method gives a more accurate estimation when there are outliers points in the observation set)

Eş. 2’de L fonksiyonu, ikinci dereceden Gauss türevinin (LoG) konvolüsyonunu ifade etmekte olup, Eş. 3’te L elemanının kutu filtre kullanılarak ulaşılan yaklaşık değerleri D olarak gösterilmektedir. w değeri, Bay vd. [15] tarafından 0,9 olarak önerilmektedir. Şekil 3, 9x9luk filtrelerin ilgili türevlerin yaklaşık gösterimini yansıtmaktadır.

Referans noktalarının çıkarımı, ölçeklenmiş görüntüler (görüntü piramidi) üzerinde farklı büyüklükteki kutu filtreler ile gerçekleştirilmektedir. Bu noktalar daha sonra maksimum olmayan piksel değerlerinin bastırılması (Non-maximum suppression) tekniği ile üst üste binen noktalardan ve gürültüden arındırılmaktadır. Elde edilen referans noktaları; genel olarak ayırt edici olup, algılama hatalarından, geometrik ve fotometrik dönüşümden etkilenmemektedir.

İki ayrı görüntü üzerinde SURF algoritması ile elde edilen noktalar iki matris seti halinde hazırlanıp ikili uzaklık analizi (pairwise distance) ile mesafelerin kare toplamı hesaplanarak eşleştirilmektedir. Kontrolsüz ortamda çekilen iki görüntü üzerinde tespit edilen referans noktaları ve noktaların eşleştirilmesi Şekil 4’te gösterilmektedir.

3.2. RANSAC Algoritması ile Homografi Tahmini

(Homography Estimation with RANSAC Algorithm)

SURF noktalarının birbirleriyle karşılaştırılması sonucunda imajların birleşimi için gerekli olan kaydırma, afin veya homografik dönüşümler yapılabilir. Bir diğer deyişle, iki imaj üzerindeki referans alınan noktalara bağlı olarak bir imajın diğerine projektif dönüşümü elde edilebilir.

Buradaki amaç görüntülerin harmanlanmasından önce birbirine en iyi şekilde hizalanmasını sağlamaktır. RANSAC algoritmasını kullanarak birbiriyle uyumlu ve eşleşen noktalardan dönüşüm matrisi (homografi matrisi) çıkarımı yapılabilir.

RANSAC, referans nokta setinden rastgele seçtiği örneklemi iteratif olarak eşlemektedir. Ancak bu sette bulunan verilerin hepsi, Şekil 5’te gösterildiği üzere, birbiriyle uyumlu noktalar (aykırı) değildir. Bu teknik iki adımlı olarak; örneklem eşleme ve örneklenen modelin tüm veri kümesi ile tutarlı olduğunu kontrol ederek parametreleri tahmin etmeye çalışmaktadır. Algoritma

bu sayede birbiriyle alakasız noktaları dışarıda bırakarak, yeterli uyumlu noktaya (konsensüs setine) sahip olana kadar optimize etmeye devam eder. Elde edilen H dönüşüm matrisi ile verilen pikselin (x, y) yeni konumu Eş. 4 ile hesaplanabilir.

$$H = \begin{bmatrix} h_{00} & h_{01} & h_{02} \\ h_{10} & h_{11} & h_{12} \\ h_{20} & h_{21} & h_{22} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Burada (x_1, y_1) orijinal noktayı ve (x_2, y_2) karşılık gelen noktayı ifade etmektedir.

3.3. Poisson Algoritması ile İmaj Harmanlama (Image Blending with Poisson Algorithm)

İmaj birleştirmede son adım olarak, aynı düzlem üzerine oturtulmuş imajların kesişen bölgelerinin harmanlanması işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla “Poisson blending” olarak da bilinen gradyan tabanlı harmanlama kullanılmıştır. Poisson denklemi, optimizasyon problemi halinde Eş. 5’teki gibi yazılabilir [41]:

$$\min_f \iint_{\Omega} |\nabla f - \mathbf{v}|^2 \quad f|_{\partial\Omega} = f * |_{\partial\Omega} \quad (5)$$

Burada ∇ gradyan operatörü, f ana imajın fonksiyonu, $f *$ hedef imajın fonksiyonu, \mathbf{v} vektör alanı, Ω harmanlanacak bölgeyi ve $\partial\Omega$ bölgenin sınırlarını ifade etmektedir. Bir imajdaki her piksel için, diğer imajda karşılık gelen pikselin komşularına göre (Laplace filtresine uygun olarak) gradyan değerleri hesaplanabilir. N_p piksel, p nin 4 bağlı komşusu, $\langle p, q \rangle$ piksel çiftleri ve v_{pq} , $\mathbf{v} \left(\frac{p+q}{2} \right)$ ’nin projeksiyonunu ifade edecek şekilde; Eş. 5’ten Eş. 6’daki doğrusal denkleme dönüşüm yapılabilir. Eş. 6’da gösterilen eşitlik, doğrusal en küçük kareler yöntemiyle çözülebilmektedir.

$$|N_p|f_p - \sum_{q \in N_p} f_q = \sum_{q \in N_p} v_{pq} \quad (6)$$

Şekil 6’da RANSAC tabanlı homografi dönüşümü ve imajların harmanlanması işlemi gösterilmiştir.



Şekil 6. Homografik dönüşüm ile imaj hizalama ve gradyan harmanlama (Image alignment with homographic transformation and gradient based blending)



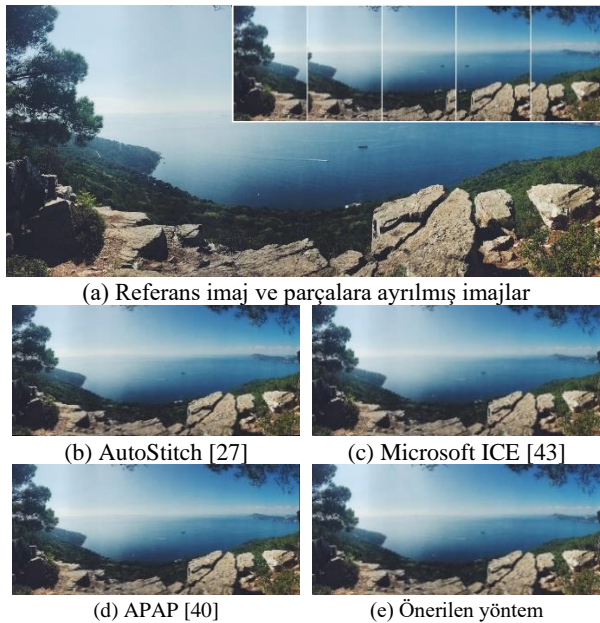
Şekil 7. Önerilen yöntemin Adobe veri seti [42] üzerine uygulanması. Harmanlanan imajlardan elde edilen panoramik görüntülerde düz hatlar ve kıvrımlar kesintisiz devam etmekte, geometrik nizam korunmaktadır (Implementation of the proposed method on the Adobe dataset. In the panoramic images obtained from the blended images, straight lines and folds continue without interruption and the geometric order is preserved)

4. DENEYSEL SONUÇLAR (EXPERIMENTAL RESULTS)

Bu kısımda önerilen tekniğin kontrolsüz imajlar üzerinde yapılan deney sonuçları verilmektedir. Örnek görüntülere ait herhangi bir kamera parametre bilgisi (açı, pozlandırma süresi, odak uzaklığı gibi) kullanılmamıştır. Yapılan çalışma, literatürdeki mevcut çalışmalar ile üç ayrı deney üzerinde incelenmiştir.

İlk nitel deney, “Adobe Panoramas Dataset” [42] üzerinde gerçekleştirilmiştir. Önerilen çalışma, veri seti üzerindeki kısmi eşlesen parça imajlar üzerine uygulanmış, elde edilen panoramik imajlar Şekil 7’de sunulmuştur. İlk imajda görülen asma köprüünün askı halatlarının düz ve birbirine paralel olarak devam etmesi; ikinci imajda dağ kıvrımları ve ufuk çizgisinin bozulmadan, sürekli çizgi üzerinde ilerlemesi yöntemin doğruluğunu göstermektedir. Son imajda da benzer şekilde binalar arasındaki geometrik nizamın korunduğu görülmektedir.

İkinci test olarak gerçek (referans) panorama görüntüsü bilinen bir imaj üzerinde nicel ve nitel bir deney gerçekleştirilmiştir. Şekil 8’de görüldüğü üzere parçalara ayrılmış imajlar, literatürdeki algoritmalar kullanılarak birleştirilmiştir. Buna ek olarak, Microsoft Research’e ait Image Composite Editor (ICE) 2.0 [43] isimli yazılım da önerilen algoritma ile test edilmiştir. Görüntülerin birleştirilmesi ile elde edilen panoramik imaj ve gerçek imaj arasında ortalama karesel hata (Mean Squared Error, MSE) ve sıkça kullanılan imaj kalite metriklerinden olan yapısal benzerlik endeksi (Structural Similarity Index, SSIM) [44] hesaplanmıştır. Elde edilen görüntüler her ne kadar nitelik ve görsel olarak oldukça benzer olsa da Çizelge 2’de nicel olarak gösterildiği üzere elde edilen birleşik imajlarda önerilen yöntem daha yüksek kalitede sonuçlar vermektedir.



Şekil 8. Önerilen yöntemin diğer çalışmalar ile nitel değerlendirilmesi (Qualitative evaluation of the proposed method)

Çizelge 2. Önerilen yöntemin diğer çalışmalar ile nicel (ortalama karesel hata ve yapısal benzerlik endeksi) değerlendirilmesi (Quantitative evaluation (mean square error and structural similarity index) of the proposed method)

Yöntem	Kullanılan Algoritma	MSE	SSIM
AutoStitch [27]	SIFT + RANSAC + Çok Bantlı Harmanlama	0,0109	0,7327
MS ICE [43]	Bilinmiyor (lisanslı ürün)	0,0077	0,8048
APAP [40]	SIFT + İlerlemeli DLT + Doğrusal Harmanlama	0,0068	0,8257
Önerilen	SURF + RANSAC + Poisson Harmanlama	0,0040	0,8696

Son olarak, yöntemin başarımını farklı senaryolarda da incelemek üzere Herrmann vd. [45] tarafından sunulan imajlar üzerinde bir değerlendirmeye gidilmiştir. Şekil 9’da iç mekân ve Şekil 10’da metin birleştirme durumlarına ait sonuçlar gösterilmektedir. Şekil 9’da karşılaştırma yapılan çalışmaların sonuçlarına bakıldığında; imajlarda gölgelenme (b), geometrik düzenin bozulması (c), görüntüde eksik bölge (d) gibi hataların olduğu gözlemlenmektedir. Önerilen yöntemin belirtilen hatalardan korunduğu ancak gradyan harmanlama sebebiyle renk bozulmasına uğradığı görülmektedir.



Şekil 9. Önerilen yöntemin iç mekân senaryosunda değerlendirilmesi (Evaluation of the proposed method in an indoor scenario)

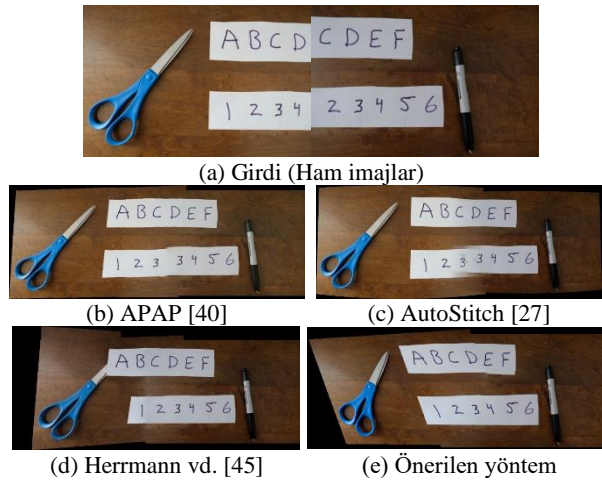
Metin birleştirme üzerine yapılan değerlendirmede, Şekil 10’da gösterildiği üzere, özellikle üst üste binen kısımların hizalanmasından kaynaklı hatalar gözlemlenmektedir. APAP [40] birleştirme işlemi veriyi tekrar ederken (b), AutoStitch [27] de geometrik nizamın bozulduğu (c) tespit edilmiştir. Herrmann vd. [45] metin birleştirmeyi başarılı bir şekilde gerçekleştirdiği, ancak imajda bölgesel veri kaybı (makasın metnin altında kaybolması) (d) yaşandığı görülmektedir. Önerilen yöntem görsel anlamda diğer çalışmalardan daha yüksek kalitede sonuç vermektedir.

5. SONUÇ VE TARTIŞMA (CONCLUSION AND DISCUSSION)

Bu çalışmada kontrolsüz ortamda çekilen imajların birleştirilmesi üzerine bir yöntem sunulmuştur. Görüntüler üzerinde SURF algoritması ile tespit edilen referans noktaları, RANSAC tekniği ile ayıklanıp eşleştirilerek imajların homografi (projektif dönüşüm) tahmini yapılmıştır. Özellik tabanlı nokta tanıma işlemi gerçekleştirildiğinden, önerilen yöntem gürültü ve

hatalardan etkilenmemekte, görüntülerin ölçeği, yönü, hizası ve sırasından bağımsız olarak çalışmaktadır. Aynı düzlem üzerine oturtulan imajlar gradyan tabanlı harmanlama yöntemiyle birbirine harmanlanmıştır. Yapılan deneylerde nicel ve nitel olarak diğer çalışmalardan daha yüksek kalitede sonuçlar alınmıştır.

Gelecekteki çalışmalarda işlem basamaklarında kullanılan yöntemler eşdeğer yöntemler ile karşılaştırılarak bir öz değerlendirme yapılabilir. Düşük ve çok yüksek çözünürlükte çekilmiş imajlar ve imaj serileri (video) üzerinde farklı harmanlama ve montaj teknikleri test edilebilir. Son olarak önerilen çalışma, Lee ve Sim'in çalışmasında [48] görülebileceği üzere, özellikle büyük paralaksa sahip imajların birleştirilmesinde sıkça görülen hatalarının temizlenmesini kapsayacak şekilde genişletilebilir.



Şekil 10. Önerilen yöntemin metin görüntüsü birleştirme senaryosunda değerlendirilmesi (Evaluation of the proposed method in a text image stitching scenario)

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Anıl BAŞ: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Szeliski R., "Image alignment and stitching: A tutorial", *Found. Trends Comput. Graph. Vis.*, 2 (1): 1-104, (2007).
- [2] Sadi, S., Perdices-Gonzalez, S., Budhiraja, R., Lee, B. D., Khwaja, A. M. ve Mistry, P., "Image stitching for three-dimensional video", *U.S. Patent No. 10,313,656*, (2019).

- [3] Li, Y., Randall, C.J., van Woessik, R. ve Ribeiro, E., "Underwater video mosaicing using topology and superpixel-based pairwise stitching", *Expert Syst. Appl.*, 119: 171-183, (2019).
- [4] PyarWin, K. ve Kitjaidure, Y., "Biomedical Images Stitching using ORB Feature Based Approach", *IEEE International Conference on Intelligent Informatics and Biomedical Sciences*, Bangkok-Thailand, 221-225, (2018).
- [5] Hügl, S., Eckardt, F., Lexow, G. J., Majdani, O., Lenarz, T., ve Rau, T. S., "Increasing the resolution of morphological 3D image data sets through image stitching: application to the temporal bone", *Comput. Methods Biomech. Biomed. Eng. Imaging Vis.*, 5(6): 438-445, (2017).
- [6] Chen, W., Fu, Z., Yang, D. ve Deng, J., "Single-image depth perception in the wild", *30th Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS)*, Barcelona-Spain, 730-738, (2016).
- [7] Han, B. ve Lin, X., "A novel hybrid color registration algorithm for image stitching", *IEEE Trans. Consum. Electron.*, 52(3): 1129-1134, (2006).
- [8] Schmid, C., Mohr, R. ve Bauckhage, C., "Evaluation of interest point detectors", *Int. J. Comput. Vis.*, 37(2): 151-172, (2000).
- [9] Chavel, I., "Eigenvalues in Riemannian geometry", *Academic Press*, Florida, USA, (1984).
- [10] Harris, C. G. ve Stephens, M., "A combined corner and edge detector", *Alvey vision conference*, Manchester-UK, 147-151, (1988).
- [11] Kang, J., Xiao, C., Deng, M., Yu, J. ve Liu, H., "Image registration based on harris corner and mutual information", *IEEE International Conference on Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology*, Harbin-China, 3434-3437, (2011).
- [12] Mikolajczyk, K., Tuytelaars, T., Schmid, C., Zisserman, A., Matas, J., Schaffalitzky, F., Kadir, T. ve Van Gool, L., "A comparison of affine region detectors", *Int. J. Comput. Vis.*, 65(1/2): 43-72, (2005).
- [13] Lowe, D. G., "Distinctive image features from scale-invariant keypoints", *Int. J. Comput. Vis.*, 60(2): 91-110, (2004).
- [14] Wu, J., Cui, Z., Sheng, V. S., Zhao, P., Su, D. ve Gong, S., "A Comparative Study of SIFT and its Variants", *Meas. Sci. Rev.*, 13(3): 122-131, (2013).
- [15] Bay, H., Tuytelaars, T. ve Van Gool, L., "Surf: Speeded up robust features", *European Conference on Computer Vision (ECCV)*, Graz-Austria, 404-417, (2006).
- [16] Bauer, J., Sünderrhauf, N. ve Protzel, P., "Comparing several implementations of two recently published feature detectors", *International Conference on Intelligent and Autonomous Systems (IAV)*, Toulouse-France, 40(15): 143-148, (2007).
- [17] Fischler, M. A. ve Bolles, R. C., "Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography", *Commun. ACM*, 24(6): 381-395, (1981).
- [18] Rousseeuw, P. J., "Least median of squares regression", *J. Am. Stat. Assoc.*, 79(388): 871-880, (1984).
- [19] Hartley, R. ve Zisserman, A., "Multiple view geometry in computer vision", *Cambridge University Press*, Cambridge, UK, (2003).
- [20] Legendre, A. M., "Nouvelles méthodes pour la détermination des orbites des comètes" [New Methods

- for the Determination of the Orbits of Comets] (Fransızca), *F. Didot.*, Paris, France, (1805).
- [21] Özkaya, N., Sağiroğlu, Ş., ve Beşdok, E., “Genel Amaçlı Otomatik Parmakizi Tanıma Sistemi Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi”, *Journal of Polytechnic*, 8(3): 239-247, (2005).
- [22] Lu, G. ve Wong, X. I., “Taking me to the correct place: Vision-based localization for autonomous vehicles”, *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, Taipei-Taiwan, 2966-2970, (2019).
- [23] Muzaffer, G. ve Uluşta, G., “Detection of copy move forgery based on color SURF”, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (3): 1539-1548, (2019).
- [24] Porter, T. ve Duff, T., “Compositing digital images”, *International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH)*, Minnesota-USA, 253-259, (1984).
- [25] Burt, P. ve Adelson, E., “The Laplacian pyramid as a compact image code”, *IEEE Trans. Commun.*, 31(4): 532-540, (1983).
- [26] Burt, P. ve Adelson, E., “A multiresolution spline with application to image mosaics”, *ACM Trans. Graphics*, 2(4): 217-236, (1983).
- [27] Brown, M. ve Lowe, D. G., “Automatic panoramic image stitching using invariant features”, *Int. J. Comput. Vis.*, 74(1): 59-73, (2007).
- [28] Efros, A. A. ve Freeman, W. T., “Image quilting for texture synthesis and transfer”, *International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH)*, California-USA, 341-346, (2001).
- [29] Long, J. ve Mould, D., “Improved image quilting”, *Graphics Interface Conference (GI)*, Québec-Canada, 257-264, (2007).
- [30] Pérez, P., Gangnet, M. ve Blake, A., “Poisson image editing”, *International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH)*, California-USA, 313-318, (2003).
- [31] Hu, C., Huo, L.Z., Zhang, Z. ve Tang, P., “Multi-Temporal Landsat Data Automatic Cloud Removal Using Poisson Blending”, *IEEE Access*, 8: 46151-46161, (2020).
- [32] Chen, W. C. ve Tsai, W. J., “Region-based poisson blending for image repairing”, *SAI Intelligent Systems Conference*, London-UK, 416-430, (2018).
- [33] Chen, S., Jin, M., Zhang, Y. ve Zhang, C., “Infrared blind-pixel compensation algorithm based on generative adversarial networks and Poisson image blending”, *Signal Image Video Process.*, 14(1): 77-85, (2020).
- [34] Agarwala, A., Dontcheva, M., Agrawala, M., Drucker, S., Colburn, A., Curless, B., Salesin, D. ve Cohen, M., “Interactive digital photomontage”, *International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH)*, California-USA, 294-302, (2004).
- [35] Nirkin, Y., Keller, Y. ve Hassner, T., “FSGAN: Subject agnostic face swapping and reenactment”, *International Conference on Computer Vision (ICCV)*, Seoul-South Korea, 7184-7193, (2019).
- [36] Wang, Z. ve Yang, Z., “Review on image-stitching techniques”, *Multimed. Syst.*, 26: 413-430, (2020).
- [37] Li, N., Xu, Y. ve Wang, C., “Quasi-homography warps in image stitching”, *IEEE Trans. Multimedia*, 20(6): 1365-1375, (2017).
- [38] Lin, K., Jiang, N., Cheong, L. F., Do, M. ve Lu, J., “Seagull: Seam-guided local alignment for parallax-tolerant image stitching”, *European Conference on Computer Vision (ECCV)*, Amsterdam-Netherlands, 370-385, (2016).
- [39] Jovanovski, B. L. ve Li, J., “Image-stitching for dimensioning”, *U.S. Patent No. 10,402,956*, (2019).
- [40] Zaragoza, J., Chin, T. J., Tran, Q. H., Brown, M. S. ve Suter, D., “As-Projective-As-Possible Image Stitching with Moving DLT”, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 36(7): 1285-1298, (2014).
- [41] Lalonde, J. F., Hoiem, D., Efros, A. A., Rother, C., Winn, J. ve Criminisi, A., “Photo clip art”, *ACM Trans. Graphics*, 26(3): 3-es, (2007).
- [42] Brandt, J., “Transform coding for fast approximate nearest neighbor search in high dimensions”, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, California-USA, 1815-1822, (2010).
- [43] Microsoft Research, “Image Composite Editor (ICE) 2.0”, <https://www.microsoft.com/en-us/research/product/computational-photography-applications/image-composite-editor>, Erişim tarihi Ekim 30, (2020).
- [44] Wang, Z., Bovik, A. C., Sheikh, H. R. ve Simoncelli, E. P., “Image quality assessment: from error visibility to structural similarity”. *IEEE Trans. Image Process.*, 13(4): 600-612, (2004).
- [45] Herrmann, C., Wang, C., Strong Bowen, R., Keyder, E., Krainin, M., Liu, C. ve Zabih, R., “Robust image stitching with multiple registrations”, *European Conference on Computer Vision (ECCV)*, Munich-Germany, 53-67, (2018).
- [46] Chen, Y.S. ve Chuang, Y.Y., “Natural image stitching with the global similarity prior”, *European Conference on Computer Vision (ECCV)*, Amsterdam-Netherlands, 186-201, (2016).
- [47] Adobe, “Adobe Photoshop User Guide: Create panoramic images with Photomerge”, <https://helpx.adobe.com/in/photoshop/using/create-panoramic-images-photomerge.html>, Erişim tarihi Ekim 30, (2020).
- [48] Lee, K.Y. ve Sim, J.Y., “Warping Residual Based Image Stitching for Large Parallax”, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Seattle-USA, 8198-8206, (2020)