



Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/tiha>

e-ISSN 2687-6094



Bir Fotogrametrik Bilgisayarlı Görü Tekniği olarak İHA Fotogrametrisi

Ozan Arslan ¹

^{1*} Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 41001, Kocaeli, Türkiye; (oarslan@kocaeli.edu.tr)



*Sorumlu Yazar:
oarslan@kocaeli.edu.tr

Araştırma Makalesi

Alıntı: Arslan, O. (2023). Bir Fotogrametrik Bilgisayarlı Görü Tekniği olarak İHA Fotogrametrisi. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 5(2), 59-71. (in English).

Geliş : 18.11.2023
Revize : 12.12.2023
Kabul : 19.12.2023
Yayınlama : 31.12.2023

Özet

Geleneksel fotogrametriden farklı olarak, düşük maliyetli metrik olmayan dijital kameralarla farklı yüksekliklerden ve farklı açılardan çekilmiş görüntü verilerinin toplanmasına olanak sağlayan İHA-fotogrametrisi, bilgisayarlı görü ve fotogrametrinin kombinasyonunu içeren yöntemler ve iş akış sürecine sahiptir. Bu kapsamda kullanılmakta olan Hareket Tabanlı Yapısal Algılama (SfM) tekniği, İHA- tabanlı ortofoto ve 3B arazi modeli üretiminin standart tekniği haline gelmiştir. Bu nedenle literatürde SfM fotogrametrisi terminolojisi de kullanılmaya başlamıştır. Bu çalışmada birbirine yakın terminolojiye sahip ve iç içe geçmiş yöntem ve algoritmalara sahip bu teknikler (fotogrametri, İHA-fotogrametrisi, SfM fotogrametrisi) arasındaki ayrım ve benzerlikler kavramsal olarak ve bir uygulama pratiği açısından analiz edilecektir.

Anahtar Kelimeler: İHA- fotogrametrisi, SfM, çoklu- görüntü stereo, SIFT, demet dengelemesi.

UAV Photogrammetry as a Photogrammetric Computer Vision Technique

*Corresponding Author:
oarslan@kocaeli.edu.tr

Research Article

Citation: Arslan, O. (2023). UAV Photogrammetry as a Photogrammetric Computer Vision Technique. *Turkish Journal of Unmanned Aerial Vehicles*, 5(2), 59-71.

Received : 18.11.2023
Revised : 12.12.2023
Accepted : 19.12.2023
Published : 31.12.2023

Abstract

Unlike conventional photogrammetry, UAV-photogrammetry, which allows the collection of image data taken obliquely from different heights with low-cost non-metric digital cameras, has methods and workflow processes that include the combination of computer vision and photogrammetry. In this context, the Structure from Motion (SfM) technique has become the standard technique for UAV-based orthophoto and 3D terrain model production. For this reason, SfM photogrammetry terminology has also started to be used in the literature. In this study, the distinctions and similarities between these techniques (photogrammetry, UAV-photogrammetry, SfM photogrammetry), which have close terminology and intertwined methods and algorithms, will be analysed conceptually and in terms of application practice.

Keywords: UAV-photogrammetry, SfM, multi-view stereo, SIFT, bundle adjustment.

1. Introduction

Günümüzde İHA'ların sivil ve ticari görevler için yüksek bir potansiyele sahip olduğu bilinmektedir ve çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Çevresel izleme, doğal afet izleme ve acil durum yönetimi, tarım, karayolu trafik gözetimi, elektrik ve boru hattı denetimi, yenilenebilir enerji, doğal kaynaklar, yapısal izleme ve diğer yer gözlemlerinin yanı sıra İHA'ların fotogrametrik uygulamaları yaygınlaşmış olup mühendislik ve yer bilimlerinde yüksek talep görmektedir. Hava fotoğrafçılığı ve lidar kullanan dijital haritalama da hızla artmaktadır. Günümüzde yaygın olarak İHA fotogrametrisi olarak da adlandırılan İHA- tabanlı fotogrametri, topografik haritalama, sayısal arazi modelleme, kadastral haritalama, 3B haritalama ve modelleme, ortomozaik üretim, hacimsel araştırmalar, havadan incelemeler, jeolojik ve hidrolojik haritalama dahil olmak üzere birçok uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. (Greenwood vd., 2019; Liu vd., 2014; Nex & Remondino, 2014).

Son yıllarda Hareket Tabanlı Yapısal Algılama (SfM: Structure from Motion) tekniği, ticari yazılımlar aracılığıyla İHA araçlarından elde edilen görüntülerin işlenerek yüksek çözünürlüklü sayısal yeryüzü modeli ve ortofoto haritaların üretilmesinde kullanılmaktadır. SfM tekniği, son yıllarda oldukça popüler olan, yüksek çözünürlüklü veri kümeleri üzerinde geniş ölçekte çalışmayı mümkün kılan, devrimsel nitelikte, düşük maliyetli ve kullanıcıya çeşitli avantajlar sağlayan bir fotogrametrik bilgisayarlı görü tekniğidir. SfM ve çoklu-stereo görüntü (MVS: Multi view stereo) gibi özellik belirleme algoritmalarını kullanan İHA- tabanlı fotogrametri tekniği, İHA ile ilişkili konum belirleme/kestirim sorunlarını en aza indirmektedir. SfM yönteminin çeşitli aşamalarında farklı algoritmalar kullanılmaktadır. Fotogrametrik prensipler SfM iş akışına dahil edilmiş olup bilgisayarlı görü (computer vision) algoritmalarındaki gelişmelerden kaynaklanan yönleri de vardır (Micheletti vd., 2015; Iglhaut vd., 2019; Fonstad vd., 2013).

Belirtilen gelişmelere paralel olarak ilgili bilimsel topluluklar ve yayınlanmış bilimsel çalışmalarda konu ile ilgili kavram ve terminolojilerde bir karışıklık olduğu da gözlenebilmektedir. Literatürde SfM fotogrametrisi, SfM-MVS fotogrametrisi, İHA fotogrametrisi, İHA-SfM fotogrametrisi vb. şeklinde isimlendirmelere rastlanmakta; bu adlandırmaların geleneksel fotogrametriden olan farklılıkları ve benzerlikleri konusunda net ayrımlar yapılmaksızın birbirleri yerine kullanıldığı gözlenebilmektedir. Bu açıdan öncelikle geleneksel fotogrametri ile İHA fotogrametrisi arasındaki ayrımı açık biçimde ortaya

koymak yararlı olacaktır. Buradaki soru, bu iki farklı adlandırmayı hak edecek kadar farklı olup olmadıklarıdır.

İlk bakışta farklılaşmanın ana noktası, İHA-fotogrametrisinin insansız hava araçlarına yerleştirilmiş görüntü sensörlerine dayalı 3B uzay/nesne modellemesine atıfta bulunması, geleneksel fotogrametrisinin ise klasik insanlı hava platformlarına dayanmasıdır. Ancak ayrımı oluşturan tek unsur platformlar değildir, kullanılan teknik süreç ve prosedürler açısından farklılıklar söz konusudur. Her ikisi de aynı analitik ve geometrik kavramlara, aynı fotogrametrik ölçüm sistemine ve güvenilir jeomekansal veriler üretmek için aynı arazi uygulamalarına dayanmaktadır. Bu konuyu açıklığa kavuşturmak için, son kullanıcının bakışı açısından, İHA-fotogrametrisi olarak adlandırılan bir işlemin geleneksel bir uygulamaya kıyasla çok daha kolay, erişilebilir, daha ucuz, daha hızlı ve çoklu-görev niteliğinde olduğu kabul edilmelidir. Geleneksel fotogrametri olarak adlandırılan yöntemde görüntülerin, fotogrametri uzmanları tarafından geliştirilen yüksek performanslı fotogrametrik iş istasyonlarında işlenecek düzenli resim blokları oluşturularak, iyi tanımlanmış boyuna ve enine bindirmelerle, iyi işlenmiş bir ortamda, nesnenin/arazinin nadir doğrultusunda çekilen geniş formatlı dijital metrik kameralarla elde edildiği hatırlanmalıdır. Öte yandan, İHA-fotogrametrisi olarak adlandırılan yöntem, düşük maliyetli metrik olmayan dijital kameraların, değişik açılardan/eğik görüntülerinin kullanılmasına ve farklı yüksekliklerden görüntü verilerinin toplanmasına izin vererek bu kısıtlamaları azaltmaktadır. Ayrıca, veri işleme, genel olarak, fotogrametrik haritalama konusunda çok az deneyime sahip bilgisayarlı görü uzmanları tarafından geliştirilen programlarla kolaylıkla gerçekleştirilebilmektedir.

Bu iki teknik yaklaşımın sonucu olarak, analitik veri işleme ve kullanıcı arayüzleri oldukça farklıdır. Geleneksel fotogrametri, iyi bilinen doğrusallık denklemlerine, görüntü eşleştirmeye ve blok demet dengelemesi ile fotogrametrik hava nirengisine dayanır. Öte yandan, İHA-fotogrametrisi ise, bilgisayarlı görü ve görüntü işlemenin entegrasyonu, Çoklu- Görüntü Stereo (MVS) algoritmaları ve 'ölçekten bağımsız özellik dönüşümü (SIFT)' operatörleri ile eşleştirilen SfM tekniğiyle sonuçlanmıştır (Lowe, 2004; Snavely vd., 2008). Bu da çok az kullanıcı etkileşimi ile uzayda kamera konumlandırma ve yöneltme ile geometrik problemi otomatik olarak çözerek, İHA-fotogrametrisi olarak adlandırılan tekniği fotogrametrisi olmayanlar tarafından jeo-mekansal veri toplamak için kullanımı kolay bir araç haline getirmiştir. Sonuçta kamera

kalibrasyonu, iç yöneltme, bağlama (anahtar) noktaları tespiti, YKN ölçümleri veya dış yöneltme için IMU sistemi kurulumlarıyla eşleştirilmiş doğrudan GNSS coğrafi konumlandırmasını içeren tüm işlem adımları her ikisi için de aynı olsa bile, İHA-fotogrametrisi kullanıcıları bunu neredeyse hiç fark etmemektedir.

Bir İHA'dan görüntülenen bir sahnenin veya nesnenin üç boyutlu (3B) doku kaplanmış modelinin oluşturulmasında, otomatik dış yöneltme ve 3B nokta bulutu oluşturma sürecinde SfM tekniğinin, kullanıcısı için 'kara kutu' niteliğinde, yani kapalı özellikte oluşu göz önünde bulundurulmalıdır. Kavramsal düzeyde ve algoritmik açıdan bakıldığında, SfM tekniğinin bazı örtüşmelerin varlığına rağmen fotogrametride olduğu gibi 'metrik kalite'de sonuç ürünler veren ve görüntüye dayalı bir 3B ölçüm, nesne yeniden yapılandırma ve haritalama süreci olarak değerlendirilmesi tartışmalı bir konudur. Buna rağmen bu teknikle fotogrametri disiplini arasında belirgin bir etkileşim, geçişlilik ve entegrasyon olması nedeniyle literatürde bazen 'SfM fotogrametrisi' adlandırması da yapılmıştır (ki tartışmalıdır!). Öte yandan SfM tekniğini, özensiz bir dil kullanımıyla ve yalnızca bir 'görüntü eşleştirme algoritması' olarak ele alan/adlandıran bazı yerli çalışmalar da mevcuttur. Şekil 1'den de açıkça görülebileceği gibi bu teknik, bir görüntü eşleştirme yönteminden daha fazlasıdır. Diğer taraftan ilgili meslek camialarında İHA fotogrametrisinde kullanılan yöntem ve algoritmaların birebir geleneksel fotogrametri ile aynı olduğunu varsayan ve aralarındaki farklılığın sadece platformdan ve platformla ilgili bazı kısıtlardan kaynaklandığını düşünenlerin sayısı az değildir. Bu nedenle belirtilen tüm bu teknikleri, kavramsal süreç ve kullanılan prosedürler açısından karşılaştırmalı olarak inceleyen ve özelliklerini bir uygulama örneği ile irdeleyerek tartışan bu çalışma, makalenin odak noktasını oluşturmaktadır.

2. Fotogrametrik Bilgisayarlı Görü

Fotogrametri ve bilgisayarlı görü, özünde farklı disiplinler olsa da hem fotogrametri hem de bilgisayarlı görü, ortak ve geniş ölçüde örtüşen bir teorik temeli paylaşmaktadır. Bu durum özellikle hava fotogrametrisinin tarihsel mirası göz ardı edildiğinde ve yakın resim fotogrametrisi daha genel bir durum olarak düşünüldüğünde ve böylelikle topografik uygulamalar için hava görüntüleri özel örnekler olarak ele alındığında geçerlidir. Fotogrametrisinin talep ettiği 'metrik bütünlük', her zaman geometrik doğruluktan ziyade nesne yeniden yapılandırmanın (rekonstrüksiyon) 'gerçekçiliğine' odaklanan bilgisayarlı görü ile çelişmektedir. Bilgisayarlı görü ve fotogrametrideki yöneltme modelleri temelde eşdeğer

olsa bile, fotogrametride benimsenmiş olan kesin kurallara bağlı doğrusal olmayan çözümler, bilgisayarlı görüde doğrusal olarak ele alınmaktadır. Ama yine de bu durum bilgisayarlı görünün fotogrametride potansiyeli olan yönlerini vurgulamamıza engel değildir. İki disiplin arasındaki örtüşme, geçişlilik ve etkileşim, gittikçe daha fazla entegrasyon ve işbirliğine yol açmakta ve "fotogrametrik bilgisayarlı görü"(photogrammetric computer vision) disiplini olarak adlandırılmaktadır. Öte yandan iki disiplin arasında dil birliği açısından 'epipolar' ve "demet dengelemesi" gibi birçok ortak terim olmasına rağmen, Tablo 1'de gösterildiği gibi terminolojik açıdan bazı farklılıklar da mevcuttur (Granshaw & Fraser, 2015).

Tablo 1. Terminolojik Karşılaştırma.

Bilgisayarlı Görü	Fotogrametri
Stereo eşleme problemi	Görüntü eşleştirme/eşleme
Temel matris (fundamental matrix) yöntemi	Karşılıklı yöneltme
Temel (fundamental) matris	Eş düzlemlilik koşulu
İçsel parametreler	İç yöneltme parametreleri
Dışsal parametreler	Dış yöneltme parametreleri
Mutlak konik görüntüsü	Self-kalibrasyon teorisi
Triangulasyon	Uzaysal Kestirme
Trifokal tensör	Üçlü-stereoskopik görüntü
Maliyet fonks. min. yapma	En küçük kareler kestirimi
Kamera veya optik merkezi	İzdüşüm merkezi
Kamera koordinat sistemi	Resim koordinat sistemi
Dünya koordinatları	YKN /cisim koordinatları
Kanonik yapılandırma	Normal durum

Fotogrametrik bilgisayarlı görü genel bir ifade ile; kamera kalibrasyonu ve yöneltme ile geometrik görüntü özelliklerine dayalı nesne/ sahne yeniden yapılandırması (geriçatım, rekonstrüksiyon) için gerekli olan çoklu görüntü analizinin geometrik yapısına istatistiksel bir bakış açısı sunmaktadır.

Günümüzde, yüksek kaliteli kameralar kullanılarak havadan yapılan topoğrafik haritalama uygulamalarında geleneksel fotogrametrisinin hakimiyeti tartışılmazdır. Çalışma alanı veya "nesne"si sıklıkla dünya yüzeyinin bir bölümüdür. Öte yandan, bilgisayarlı görü tamamen dijital bir ortamda, metrik olmayan kameralar kullanılarak çok az kısıtlama ile gerçekleştirilebilir. Ayrıca bilgisayarlı görüde görüntülenen nesnelerin çoğu insan yapımıdır ya da dünya yüzeyinin bir kısmı değil insanların kendisidir. Sıklıkla hava fotogrametrisinin 3B koordinatları bilgisayarlı görüde yalnızca 2.5B olarak kabul edilir. Fotogrametrik sistemler, doğruluk, güvenilirlik ve

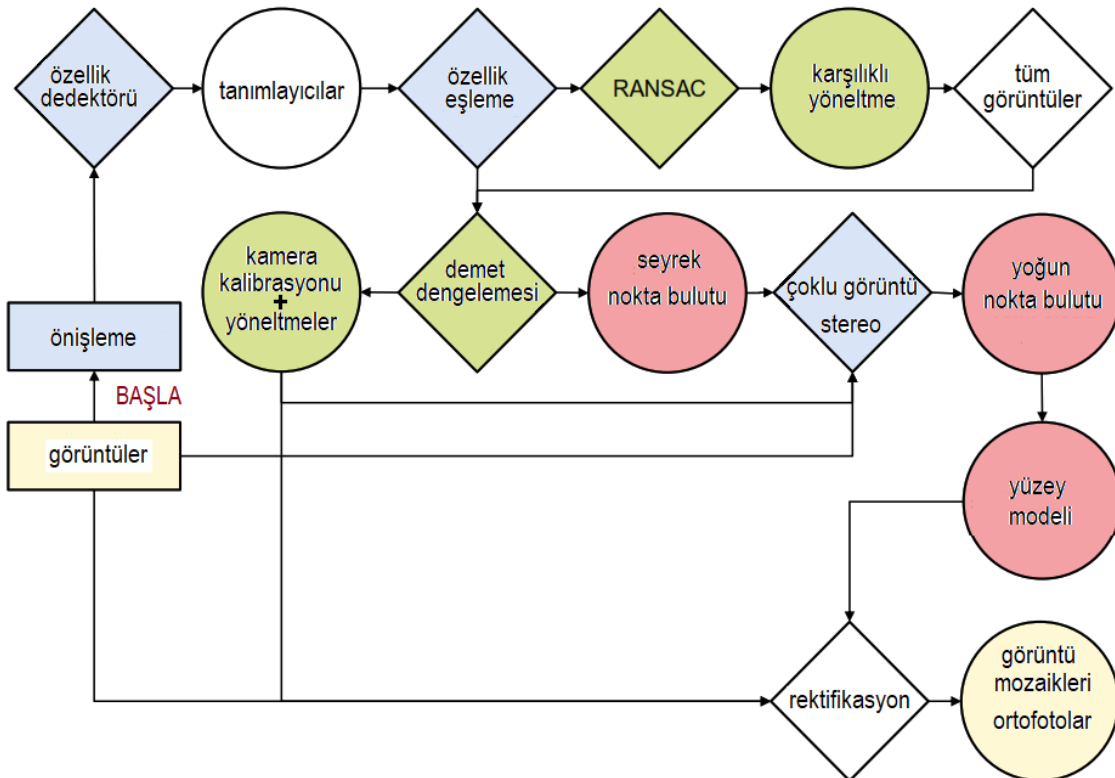
süreç sağlamlığı ve performansı konusunda zorlu gereksinimleri olan ve "metrik ölçüm yapan" bir son kullanıcı topluluğu için geliştirilmiştir. Bilgisayarlı görü ise herhangi bir 'son kullanıcı' topluluğuna karşı sorumluluk taşımadan, hakkında minimum ön bilgi bulunan görüntülerin otomatik olarak işlenmesi yoluyla mümkün olduğunca fazla bilgi çıkarımına odaklanmıştır. Fotogrametrik teknikler ve bilgisayarlı görü teknikleri iç içe geçmiştir ve aralarında geçişlilik vardır, öyle ki bir şekilde "bilgisayarlı görü topluluğundan çıktığı" söylenebilecek bazı ticari sistemler/yazılımlar, fotogrametrik modeller içermektedir ve belki de bu sayede geniş bir ticari pazara sahip olabilmişlerdir.

2.1. Hareket Tabanlı Yapısal Algılama (SfM)

En az 1979 yılına dayanan bir geçmişe sahip olan SfM tekniği, bir nesnenin veya yapının (structure) bir kameranın hareketinden (motion) üç boyutlu olarak yeniden oluşturulmasını sağlar. Burada 'hareket' teriminden kamera hareketini/ yer değiştirmesini, 'yapı' teriminden ise hem nesneyi hem de geometrisini anlamak gerekir. Hedeflenmemiş görüntü setleri için, Hareket Tabanlı Yapısal Algılama (SfM) terimi altında, kategorize edilebilecek bir dizi yerleşik yöntem ve algoritma vardır (Vasuki vd., 2014; Westoby vd., 2012). Tipik olarak, aslında ön bilgiye ihtiyaç duymadan bir görüntü çiftinin karşılıklı (eşleşen) noktalarından karşılıklı yöneltmesi için kapalı biçimde bir çözüm

vardır. Denenmiş ve test edilmiş iş akışları, görüntü işleme algoritmaları, sağlam (robust) yöneltme yöntemleri, self-kalibrasyon ile demet dengelemesi, stereo görüntü analizi ve nokta bulutu işlemenin bir kombinasyonunu kullanmaktadır (bkz. Şekil 1).

Bu iş akışlarının SfM tarafından başlatıldığı, ancak daha sonra bir fotogrametrik süreci takip ettiği söylenebilir. Genellikle SIFT olan bir ilgi veya özellik dedektörü uygulanmadan önce tüm görüntüler ön işleme tabi tutulur. Tespit edilen özellikler eşleştirildikten sonra bu detaylar, bir ilk görüntü çiftinin RANSAC tabanlı karşılıklı yöneltmesinde kullanılır. Bu başlangıç stereo modelinin seçimi kritik öneme sahiptir. Bu işlemin ardından kalan tüm görüntüler, bir demet dengelemesi ile işlenmeden önce 'başlangıç modeli'ne göre yönlendirilir. İsteğe bağlı ek veri koşulları (referans noktaları) eklenebilir ve eş zamanlı kamera kalibrasyonu hesaplanabilir. Bu aşamada, demet dengelemesi ile kestirimi yapılan nesne koordinatları halihazırda bir seyrek nokta bulutunu temsil eder. Daha yoğun bir yüzey modeli gerekli olduğunda, sıklaştırılmış- yoğun bir nokta bulutu ve dolayısıyla tam bir yüzey modeli oluşturmak için çoklu-görüntü stereo (MVS) yöntemi kullanılabilir. Yöneltilmiş görüntülerden ve yüzey modellerinden ortofotolar veya görüntü mozaikleri elde edilebilir (Ullman, 1979; Carrivick vd., 2016; Förstner & Wrobel, 2016; Westoby, 2012; Javernick vd., 2014; Sith vd., 2015).



Şekil 1: SfM tekniği diyagramı (Förstner & Wrobel, 2016).

İyi bir yüzey dokusu, uygun şekilde çekilmiş bindirmeli görüntüler ve önceden kalibre edilmiş veya görüntü alımı sırasında en azından stabil bir kamera kullanılmışsa, SfM tekniği genellikle başarılı sonuçlar vermektedir.

Otomatik olarak yönltilmesi gereken çoklu görüntü konfigürasyonunda işlem genellikle tüm görüntülerde özellik (detay) çıkarma ve ardından özellik tabanlı eşleştirmeden (matching) oluşur. RANSAC yöntemleriyle, potansiyel olarak tekrarlanan demet dengelemesi ile birleştirilmiş karşılıklı yöneltmenin sağlam (robust) hesaplanmasından sonra, tüm görüntüler için son bir demet dengelemesi hesaplanır. Tüm bu strateji sürecinin adımları Şekil 1’de özetlenmiştir.

Görüntü setlerinden yoğun nokta bulutu elde edilmesini sağlayan SfM sürecinin şematik iş akışı (giriş verileri, temel iş adımları, prosedürler ve sonuç çıktılar) ise Şekil 2’de gösterilmektedir. Nokta bulutu, görüntüler ve/veya yer kontrol noktaları için konumsal bilgiler sağlanarak coğrafi olarak referanslandırılır. SfM, bindirmeli 2D görüntü dizilerinden 3D modelleri kestirmek/ hesaplamak için kullanılır. Önceki bölümde belirtildiği üzere kamera parametreleri hakkında önceden bilgi sahibi olmadan sırasız ve heterojen görüntü kümeleriyle çalışabilme yeteneği nedeniyle son yıllarda popülerlik kazanmıştır. SfM tekniği, geleneksel fotogrametriden temel olarak üç açıdan farklıdır:

(1) farklı ölçeklerdeki, görüş açılarındaki ve yönlerdeki görüntülerde özellikler (detaylar) otomatik olarak tanımlanabilir ve eşleştirilebilir, bu da özellikle küçük ve stabil olmayan platformlar düşünüldüğünde fayda sağlar,

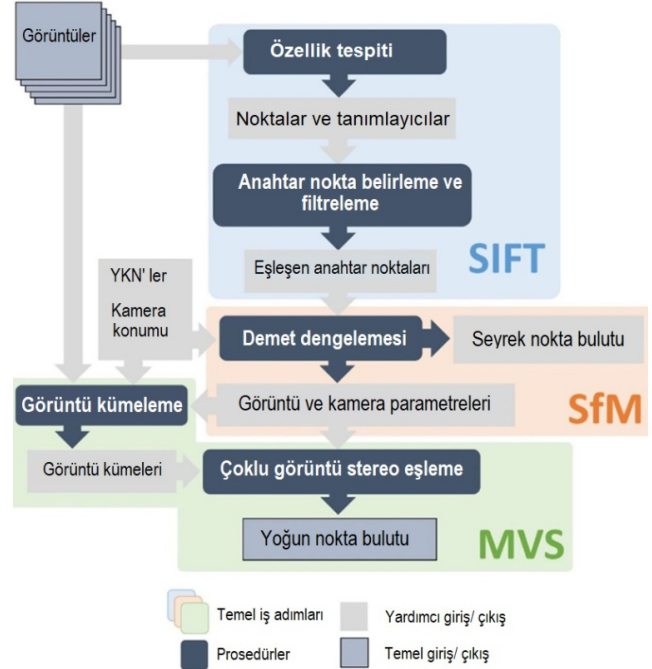
(2) algoritmada kullanılan denklemler kamera konumları veya yer kontrol noktaları bilgisi olmaksızın çözülebilir, ancak her ikisi de algoritmaya eklenebilir ve kullanılabilir,

(3) kamera kalibrasyonu işlem sırasında otomatik olarak çözülebilir veya sonradan iyileştirilebilir.

Böylece SfM, bindirmeli görüntülerde, kamera pozlarında ve kalibrasyonlarda kesin bir homojenlik gerektirmeden otomatik olarak fotogrametrik modeller üretebilir. 'SfM fotogrametrisi' genellikle görüntü setinden yoğun nokta bulutuna kadar tüm yeniden yapılandırma iş akışını tanımlamak için kullanılır. Bazı çalışmalar seyrek nokta bulutunu nihai ürün olarak kullansa da, çoğu durumda MVS gibi yoğun görüntü eşleştirme algoritmaları, nokta bulutunu yoğunlaştırmak/sıklaştırmak için sonraki bir adımda kullanılır. Bu nedenle tüm süreç bazı kaynaklarda SfM-MVS olarak da adlandırılmıştır. Şekil 2 tüm SfM-MVS sürecinin şematik iş akışını içermektedir.

SfM süreci, görüntülerdeki anahtar noktaların (yani belirgin kontrast veya dokuya sahip noktalar/ piksel

kümelere) otomatik olarak çıkarılmasıyla başlar. Anahtar noktalar tüm görüntülerde tanımlanır ve daha sonra izdüşüm yaptıkları görüntüler arasında eşleştirilir. SIFT yöntemi ve versiyonları, SfM’de anahtar nokta (key point) tanımlama ve eşleştirme için kullanılan en yaygın algoritmalar (Lowe, 2004; Juan & Gwun, 2009; Remondino & El-Hakim, 2006).



Şekil 2: SfM tekniğinde iş akışı (Iglhaut vd., 2019).

SIFT, her görüntüdeki her nokta için sayısal 'tanımlayıcılar' üretir. Bu tanımlayıcılar ölçek ve dönüklüğe karşı değişmezdir, bu nedenle farklı perspektiflerden ve farklı koşullar altında çekilen resimlerdeki noktaları veya nesnelere tanımlamak için uygundur. Ardından, anahtar nokta eşleşmelerinin tutarlılığı, görüntülerin geometrisinin kaba/ yaklaşık bir yeniden yapılandırması ve anahtar noktaların bunlar üzerindeki karşılıklı konumu kullanılarak kontrol edilir.

Yeterli sayıda görüntü ve anahtar nokta eşleşmesi verildiğinde, SfM kamera poz bilgilerinin (kamera konum ve yöneltme) ve parametrelerini ve sahnenin seyrek bir 3B nokta bulutunu (farklı görüntülerde eşleşen anahtar noktaların konumundan oluşan) eşzamanlı olarak hesaplamak için demet dengelemesini gerçekleştirir. Demet dengelemesi, (i) rastgele seçilen eşleşen anahtar noktaların dizilerinden elde edilen başlangıç değerleri ve tamamlayıcı olarak kamera ve pozlardan elde edilen parametreler ve (ii) doğrusal olmayan bir iyileştirme kullanılarak çözülür. Ardından, SfM'nin çıktıları, yer kontrol noktalarına (YKN'ler) ve/veya kameradan veya platformundan navigasyon cihazlarından gelen verilere dayalı olarak ölçeklendirilir ve coğrafi olarak referanslandırılır.

SfM'den elde edilen kamera poz bilgileri ve parametreleri daha sonra MVS algoritmaları kullanılarak yoğunlaştırılmış bir nokta bulutu oluşturmak için uygulanır. MVS sıklaştırma işleminden önce, hesaplama verimliliği ve hatta uygulanabilirlik için, görüntüler konumlarına göre gruplandırılır. Bu şekilde, her bir kümenin (yani görüntü grubunun) yoğun nokta bulutu ayrı ayrı hesaplanır. Giriş görüntülerinden türetilen renk/spektral bilgileriyle yoğun bir nokta bulutu, SfM iş akışının birincil çıktısını temsil eder. Sonraki işleme adımları tipik olarak bir dijital yüzey modelinin (DSM) ve bir ortomozağin türetilmesini sağlar.

Geleneksel fotogrametride elde edilecek sonuçlar büyük ölçüde giriş verilerine (sensör ve görüntü verileri, uçuş planlaması ve parametrelerin tasarımı vb.) bağlı olarak etkilenir. Bilgisayarlı görü ile özellikleri tanımlamak ve eşleştirmek için otomatik bir süreç kullanan SfM ise temelde görüntü kalitesine bağlıdır. Sensörler, ayarlama/ kurulumlar ve alım tasarımları büyük bir dikkatle değerlendirilmelidir. Her durumda, (i) ortamdan gelen etkiler (aydınlatma koşulları), (ii) platform (İHA, direk, tripod veya el tipi) ve (iii) kamera ve lens kombinasyonu ('pozlama üçgeni: ISO, örtücü hızı ve açıklık', odak uzaklığı, sensör boyutu) gibi bir dizi kısıtlama göz önüne alındığında optimum görüntü verilerinin elde edilmesini sağlamak için kamera ayarlamalarının dikkate alınması gerekir.

Özel test alanlarında gerçekleştirilmiş ve SfM tekniğini kullanan bir sistem/ yazılım aracılığıyla üretilen haritaların ve 3B modellerin kalitesi hakkındaki teknik bulguları paylaşan deneysel çalışmalara literatürde sıklıkla rastlanmaktadır. Bu çalışmada ise tasarlanmış özel bir test alanı ve farklı uçuş parametre kombinasyonu kullanmaksızın rutin olarak gerçekleştirilen bir mesleki uygulamanın sonuçları irdelenecektir.

2.2. Literatürde Konuyla İlgili Çalışmalar

Esnek yapıları ve insanlı hava platformlarına kıyasla düşük maliyetleri nedeniyle fotogrametrik veri toplama için popüler bir platform haline gelen İHA'lar aracılığıyla; yoğun nokta bulutları, sayısal yükseklik modelleri ve ortomozaikler gibi ürünler, sadece az sayıda yüksek hassasiyetli YKN kullanılarak santimetre düzeyinde doğrulukla rutin olarak elde edilebilmektedir (Lucieer vd., 2014; Peppas vd., 2016; Reshetyuk & Martensson, 2016; Murtiyoso & Grussenmeyer, 2017).

Geleneksel GPS destekli hava triyngulasyonunda olduğu gibi, İHA görüntüleri güçlü bir blok geometrisi içeriyorsa, görüntü bağlama noktalarının yoğun ve düzenli bir dağılımını sağlamak için iyi, tutarlı bir sahne dokusu varsa, kamera (izdüşüm merkezi)

yükseklikleri blok demet dengelemesinde yüksek doğrulukla hesaplanabilir. Dahası, bu konfigürasyonda, mevcut hafif IMU gözlemlerinin nispeten düşük doğruluğu, geleneksel entegre sensör yöneltmesine göre demet dengelemesinde çok az ek kısıtlama getirir (Rehak & Skaloud, 2015; Stöcker vd., 2017). Bu nedenlerle, İHA fotogrametrisinde YKN'leri kaldırmaya yönelik yaklaşımlar genellikle yalnızca kamera konumlandırması ile ilgilidir (Gerke & Przybilla, 2016).

Doğrudan jeoreferanslama kullanılarak elde edilen İHA nokta bulutlarının doğruluğunu etkileyen önemli bir faktör (dolayısıyla YKN'lerin yokluğunda) GPS tabanlı kamera konumlarının kalitesidir. Blok geometrisi, görüntü ölçüm kalitesi ve yer örnekleme aralığı (YÖA) gibi diğer faktörlerin yanı sıra, santimetre düzeyinde doğruluğa sahip GPS konumları da santimetre hassasiyetinde haritalama yapılmasına yardımcı olmaktadır (Turner vd., 2014).

İHA fotogrametrisi ile elde edilen ürünlerin doğruluğunu değerlendirmek için çok sayıda çalışma yapılmıştır. Birçok yazar belirli parametrelerin, elde edilen ürünlerin doğruluğu üzerindeki etkisini incelemiştir. Agüera-Vega vd. (2016), uçuş yüksekliği, arazi morfolojisi ve YKN sayısının Sayısal Yüzey Modeli (DSM) ve ortofoto doğruluğu üzerindeki etkisini incelemiştir. Amrullah vd. (2016), İHA fotogrametri projelerinde hassasiyeti ve doğruluğu artırmak için metrik olmayan eğik ve düşey kameranın YKN'lerin konfigürasyonu ile birlikte kombinasyonunun etkisini test etmiştir. Dandois vd. (2015), orman yapısının bilgisayarlı görü İHA kestirimleri için en uygun yükseklik, bindirme oranı ve hava koşullarını incelemiştir. Mesas-Carrascosa vd. (2016), arkeolojik alanların araştırılması için İHA ortomozaiklerinin oluşturulmasında uçuş parametrelerinin (yer seviyesinden uçuş yüksekliği, boyuna ve enine bindirme ve YKN'lerin kullanımı veya eksikliği) etkisinin bir analizini gerçekleştirmiştir.

Vautherin vd. (2016) geleneksel (sarmal deklanşör/örtücü olmayan) kamera modellerini, hem coğrafi referanslı kontrol noktalarının doğruluğu hem de hareket tabanlı kestirimin kalitesi açısından yeni uygulanan bir sarmal deklanşör modeliyle karşılaştırmıştır. Ayrıca, İHA'nın hızının (ve yönünün) yalnızca kameranın sarmal deklanşör etkisinden tahmin edilebileceğini göstermeyi başarmışlardır. Jaud vd. (2016) ile Murtiyoso ve Grussenmeyer (2017), farklı yazılım uygulamaları tarafından hesaplanan 3B yeniden yapılandırmanın doğruluğunu değerlendirmiştir. Wierzbicki vd. (2015) İHA görüntü kalitesinin ortofoto üretimi üzerindeki etkisini incelemiştir. Yapılan doğruluk analizine göre, kötü hava koşullarında (bulutlu, yağışlı) elde edilen görüntülerin fotogrametrik ürünün nihai kalitesini ve doğruluğunu ortalama %25 oranında düşürdüğü

belirtilmiştir. Eisenbeiss ve Sauerbier (2011) fotogrametrik uygulamalar için İHA sistemleri ve uçuş modları üzerine bir araştırma gerçekleştirmiştir.

Optik ve lazer tarama sistemleri gibi nokta bulutu üretim teknolojileri arasında lazer tarayıcılar, yoğunluk/yansıtma değerleri ile birlikte doğrudan 3B konumsal veri sağlamaktadır. Bu tür bir ölçüm sistemi, yersel lazer tarayıcılarda (TLS), havadan lazer tarayıcılarda (ALS), el tipi veya sırt çantası lazer tarayıcılarda veya LiDAR monte edilmiş İHA haritalama sisteminde ortaya çıkmaktadır (Chen vd., 2019). İHA görüntüleri ve LiDAR nokta bulutu verileri birbirini tamamlayıcı niteliktedir ve birinin zayıflığı diğerinin gücü ile aşılabildiğinden, bu ikisinin kombinasyonu; 3B yeniden yapılandırma ve modellemenin doğruluğunu, eksiksiz olma özelliğini ve verimliliğini artırır. Yapılan birçok çalışma, 3B modelleme (Remondino & El-Hakim, 2006), değişiklik tespiti (Islam vd., 2018), bina çıkarımı (Dornaika vd., 2016), nesne tanımlama (Kent vd., 2015), 3B nesne modelleme (Prieto vd., 2020) ve 3B ağaç taç örtüsü analizi gibi çok sayıda uygulama için, bu veri füzyonunun önemini doğrulamıştır. Bir İHA fotogrametrisi projesinde YKN tesis, ölçü ve hesaplama işlemlerinin zaman alıcı ve maliyet açısından verimsiz görevler olması nedeniyle, İHA fotogrametrik ağında hava triyngulasyonu gerçekleştirmek için 3B LiDAR mobil haritalama sistemi ölçümlerinden de yararlanılmaktadır. Tamamlayıcı bilgi olarak İHA görüntülerinin entegrasyonu, bir üretim hattındaki otomasyon seviyesini artırmanın yanı sıra ölçüm süresini de azaltmayı sağlamaktadır. Test veri setleri üzerinde gerçekleştirilen analizlerin yeniden- projeksiyon hatası, birkaç santimetre doğruluğuna karşılık gelen yarım piksel boyutunda bir doğruluk göstermiştir (Naimae vd., 2023).

İHA fotogrametrisi sonucu elde edilen ürünlerin doğruluğunu etkileyen faktörler arasında, YKN'lerin sayısının ve çalışma alanındaki dağılımının etkisi özellikle önemlidir. İHA fotogrametrisi ile elde edilen ürünleri optimize etmeye çalışmak için farklı YKN dağılımları incelenmiştir. Test edilen tüm dağılımlar arasında en iyi sonuçlar, kenar dağılımı ve katmanlı dağılım ile elde edilmiştir. Buna göre planimetrik hataları en aza indirmek için YKN'leri çalışma alanının kenarına yerleştirmek gerektiği ifade edilmiştir. Buna ek olarak, yükseklik hatalarını en aza indirmek için çalışma alanı içinde yaklaşık $0,5-1 \text{ YKN} \times \text{ha}^{-1}$ yoğunluğunda katmanlı bir dağılım oluşturulması tavsiye edilmiştir. Bu iki dağılımın kombinasyonu elde edilen toplam hatayı minimum seviyeye indirebilmektedir (Martínez-Carricondo vd., 2018). Rangel vd. (2018) YKN'lerin görüntü bloğuna göre (çevresel ve dahili olarak) mekansal dağılımını incelemiş ve YKN'lerin bloğun içine dahil edilmesinin

planimetrik hatayı önemli ölçüde iyileştirmediğini; ancak yükseklik hataları söz konusu olduğunda, YKN sayısı arttıkça hatanın önemli ölçüde azaldığını ortaya koymuşlardır. Ayrıca yazarlar, en iyi sonuçlar için, üç ila dört zemin taban mesafesi (uçuş bazı) yatay ayrımı ile blok içindeki YKN'lerin düzgün bir dağılımının sağlanması gerektiğini ifade etmişlerdir. Martínez-Carricondo vd. (2018) YKN'lerin sayısının ve mekansal dağılımlarının etkisini araştırmış; planimetrik hataların en aza indirilmesi için YKN'leri çalışma alanının kenarına yerleştirmenin ve altimetrik hataları en aza indirmek için yaklaşık $1,7 \text{ GCP/ha}$ yoğunlukta katmanlı bir dağılım oluşturmanın gerekli olduğunu ortaya koymuşlardır.

İHA tabanlı görüntü bloklarını oluştururken ele alınması gereken bir diğer konu, demet dengelemesi esnasında iç yönlüme parametrelerinin yeterli doğrulukta kestirilmesi gerekliliğidir. Bu süreç, kameranın fiziksel kararlılığı bilinmediği için ek olarak başka bir belirsizlik kaynağı oluşturabilir. Çapraz uçuş modelleri ve farklı uçuş yüksekliklerinin self-kalibrasyon sürecini daha güvenilir hale getirebileceği gösterilmiştir. İlgili birçok makalede, İHA tabanlı görüntü bloklarının dolaylı sensör yönlümesini desteklemek için YKN'lerin kullanımı analiz edilmiştir. Bir husus, YKN'lerde ihtiyaç duyulan konumsal doğrulukla ilgilidir. Görüntü yönlümesinde piksel düzeyinde mutlak doğruluk hedefleniyorsa, bu durum uygun referans bilgisine ihtiyaç duyulduğu anlamına gelmektedir. Günümüzde, İHA projelerinde 2 - 3 cm'lik bir YÖA kolayca elde edilebildiğinden; arazideki 3B noktaların en azından son teknoloji GNSS-RTK teknolojisi veya yersel elektronik ölçme aletleri ile ölçülmesi gerektiği anlamına gelmektedir (Gerke & Przybilla, 2016).

Sanz-Ablanedo vd. (2018) doğrudan coğrafi konumlandırma doğruluğunun belirlenmesine ilişkin farklı çalışmaları derlemişler ve genel bir sonuç olarak, yükseklik doğruluğunda desimetrenin altında bir doğruluk isteniyorsa, YKN'lerin proje tasarımına dahil edilmesi gerektiğini ortaya çıkarmışlardır. SfM tabanlı İHA ile sayısal yükseklik modeli (SYM) üretimi ile ilgili olarak hassas yer kontrol noktalarına dayalı uygun coğrafi konumlandırma kullanılırsa, birkaç desimetreden daha az çözünürlük ve doğrulukta bir SYM üretimi mümkündür (De Haas vd., 2014). Aynı sahaya odaklanmış zaman serileri biçiminde SYM'ler arasındaki koordinat farklılıkları, jeoreferanslama için yalnızca YKN'ler kullanılması durumunda sadece YKN konumlarına ve koordinatlarının ölçüm doğruluğuna bağlıdır (Clapuyt vd., 2016). İHA-SfM ile elde edilen SYM'ler sadece hava fotoğraflarından kaynaklanan dönüklük hatalarını değil, aynı zamanda jeoreferanslama belirsizliği ile ilgili ölçek hatalarını da içerir (Carbonneau & Dietrich, 2017).

2.3. SfM Tabanlı İHA Fotogrametrisi Uygulama Örneği

Son yıllarda, Gerçek Zamanlı Kinematik (RTK-GNSS'li) insansız hava sistemleri, İHA fotogrametrik uygulamalarında son teknoloji ürünü olarak görülmektedir. RTK-GNSS ile donatılmış İHA sistemlerinin kullanımı, bu sensörlerle ulusal koordinat sisteminde 2-3 cm'lik bir konumlandırma doğruluğu sunmaktadır. Sonuçta kontrol noktalarının önemli ölçüde azaltılması mümkün hale gelmiştir, bu da RTK-GNSS tabanlı platformların kullanımını birçok uygulama için daha esnek ve verimli hale getirmiştir. Farklı İHA tabanlı kamera sistemleri için havai fotogrametrik nirenginin geometrik kalitesine ilişkin sonuçlar halihazırda yayınlanmıştır (Gerke & Przybilla, 2016; Przybilla vd., 2019; 2020; Kersten & Lindstaedt, 2022; Kersten vd., 2020; Zhao vd.; 2020; 2021).

Bu çalışmada Gaziantep iline bağlı olan Tahta Köprü Barajında (Şekil 3) İHA kullanarak 45 MP Zenmuse P1 kamerası ile engebeli arazinin yaklaşık 210 m yükseklikten 423 adet yüksek çözünürlükte görüntüleri elde edilmiştir. DJI Matrice 300 RTK ile yüksek konumlandırma hassasiyetine sahip ve yüksek çözünürlüklü bir kamera ile donatılabilen bir sistem mevcuttur.

DJI Matrice 300 RTK (Şekil 4), Çinli üretici DJI Technology' ye ait 6,3 kg ağırlığında bir quadcopter olup maksimum 55 dakikalık uçuş süresiyle 5000 m'ye kadar irtifalarda kullanılabilir. Otomatik Bağımlı Gözetim -Yayın (ADS-B) çarpışma önleme sistemi ile donatılmış olan İHA, RTK-GNSS kullanarak 1,0-1,5 cm + 1 ppm konumlandırma doğruluğu elde edebilir.



Şekil 3: Çalışma alanı: Tahta Köprü Barajı.

DJI Zenmuse P1 kamera (Tablo 2) DJI tarafından Matrice 300 RTK için sunulmaktadır. Bu, farklı odak uzunluklarında sunulan çeşitli lenslerle çalıştırılabilen full-frame (35,9 mm × 24 mm) CMOS sensörle donatılmış 45 megapiksel (piksel boyutu 4,39 µm) bir dijital kameradır.



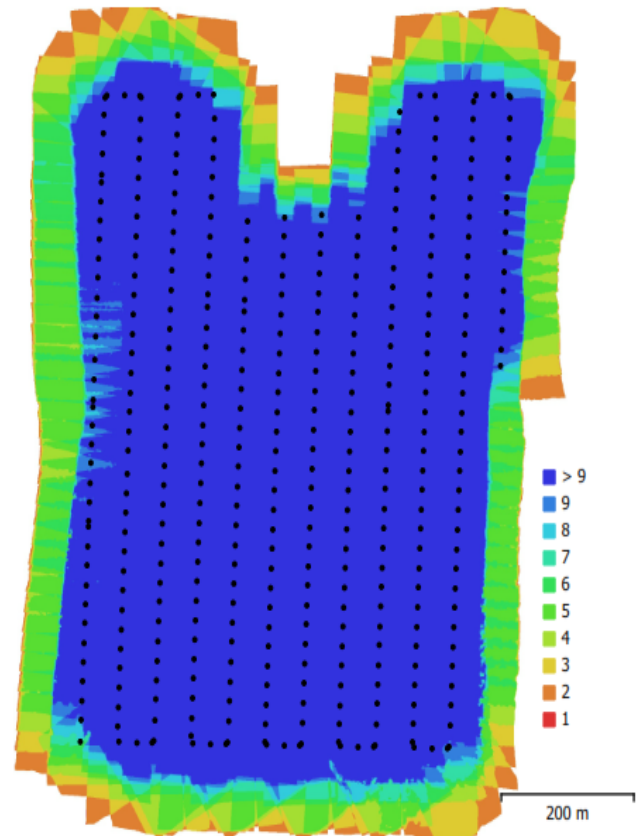
Şekil 4: DJI Matrice 300 RTK.

Bu çalışmadaki kameralarda 63,5° görüş alanına (FOV) sahip olan ve F2,8 ila F16 diyafram aralığında (F-Stops) fotoğraf çekebilen 35 mm odak uzaklığına sahip bir lens kullanılmıştır.

Tablo 2. Kamera özellikleri.

Model	Çözünürlük	Odak Uzaklığı	Pixel Boyutu
Zenmuse P1 (35mm)	8192x5460 (45MP)	35 mm	4.39x4.39 µm

Baraj alanında gerçekleştirilen bu çalışmada, üretilen harita ve yüzey modelinin doğruluk değerleri ile sistemde gerçekleştirilen prosedürlerin parametrelerini incelemek üzere Agisoft Metashape Professional (1.8.5 build 15368 version) yazılımı kullanılmıştır. Gerçekleştirilen uçuşla ilgili parametreler (Tablo 3) ve kamera konumları ile görüntü bindirmeleri Şekil 5' te sunulmuştur.



Şekil 5: Kamera konumları ve görüntü bindirmeleri.

Tablo 3: Uçuş proje parametreleri.

Parametre	Değer
Görüntü sayısı	423
Uçuş yüksekliği	208 m
Yersel çözünürlük	2.5cm/pix
Kaplanan alan	0.763 km ²
Kamera noktası	390
Bağlama noktaları	168 917
YKN sayısı	5
Geriprojeksiyon hatası	1.09 pix
DEM çözünürlüğü	9.99 cm/pix
Projeksiyon	1338740
Koordinat sistemi	TUREF/ TM36

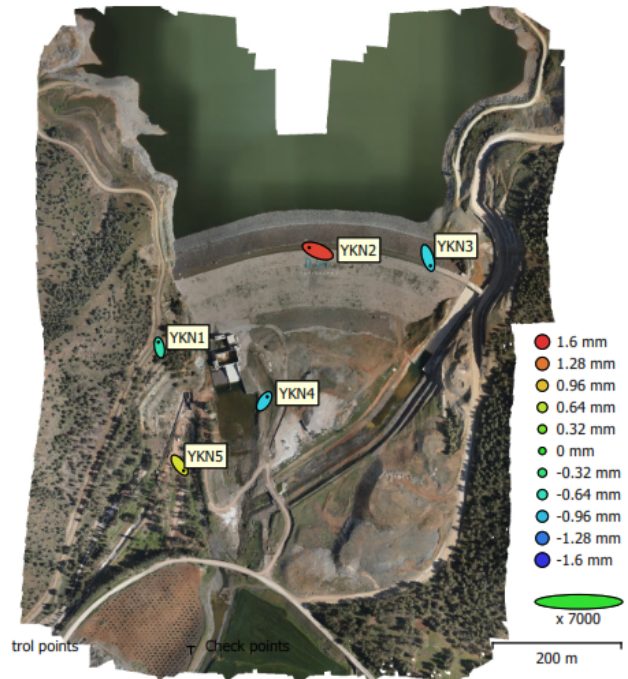
Aynı cihazın kullanıldığı benzer bir çalışma, bir test alanında Matrice 300 RTK/Zenmuse P1 sistemi ile çekilen görüntü uçuşlarında ve farklı yüksekliklerde gerçekleştirilmiştir. Uçuşlarda nadir ve eğik görüntülerin bir kombinasyonu kullanılmıştır. Bunun sonucunda ilk uçuşta 60°'lik bir açıda nadir görüntüler için 8,8 mm ve eğik görüntüler için 10,2 mm YÖA elde edilirken, ikinci nadir uçuşta YÖA 11,3 mm olmuştur. Detaylı doğruluk incelemeleri için, demet blok dengelemesi farklı sayıda ve mekansal olarak uygun dağılmış yer kontrol noktalarına bağlı olarak hesaplanmıştır. Demet dengelemesinde dış yöneltmenin konumlandırma koordinatları 11 ila 16 mm aralığında bir RMSE gösterirken, yükseklik değerlerinin sapmaları yaklaşık 11 mm olarak hesaplanmıştır (Kersten vd., 2022). Bu çalışmada gerçekleştirilen demet dengelemesinde ise dış yöneltmenin konumlandırma koordinatları 11 cm civarında bir RMSE üretirken, yükseklik değerlerinin sapmaları yaklaşık 13 cm olarak hesaplanmıştır (Tablo 4). Elde edilen bu değerler yukarıda anılan benzer çalışmadan ve genel olarak literatürde yapılan diğer çalışmalarda elde edilen doğruluk değerlerinden düşüktür. Çalışmada İHA görüntülerinden 2.5cm/pix yersel çözünürlüklü ortofoto görüntüler elde edilmiştir (Şekil 7). Engebeli arazi yüzeyine göre uygun dağılmış noktalarda tesis edilen kontrol noktalarına dayalı olarak hesaplanan ortofoto haritada ülke nokta koordinatları için min. YÖA 0.74 cm ve max. 1.08 cm olarak elde edilmiştir. Özel bir uçuş konfigürasyonu yapılmadan elde edilen bu doğruluk değerleri, ilgili yönergelerde talep edilen sınır değerlere uygundur. Çalışmanın temel konusu tasarlanmış bir test alanında doğruluk araştırması olmadığı için, farklı uçuş modları ve parametre seçimlerine yer verilmediğini belirtmek gerekir.

Çalışma alanına toplam 5 adet YKN noktası tesis edilmiştir, bu noktaların konumları ile RTK-GNSS ile belirlenen iç duyarlıkları Şekil 6'da gösterilmiştir. YKN'lerin projeye dahil edilmesinin özellikle yükseklik hatalarını azalttığı önceki bölümde belirtilmişti. YKN'lerin blok içinde yerleştirilmesinde literatürde önerilen şekilde bir mekansal dağılım

düzeni (kenar dağılımı, katmanlı yapı vb.) gözetilmemiştir. Ayrıca uçuş yükseklikleri değiştirildiğinde ve farklı uçuş modları denendiğinde, konumlandırma doğrulukları üzerine nasıl bir etki yapacağı konusu incelenmemiştir. Belirtilen nedenlerle, çalışmada elde edilen doğruluk değerlerinin, literatürde bulunan benzer örneklerle karşılaştırıldığında; öngörülen ve kabul edilebilir duyarlık sınırları içinde olduğu söylenebilir.

Tablo 4: Ortalama kamera konum hataları (RMSE).

X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	Toplam (cm)
11.2	11.3	12.6	20.3

**Şekil 6:** YKN noktaları ve duyarlıkları.

2.4. Bulgular ve Tartışma

SfM-tabanlı İHA fotogrametrisi çalışmalarında doğruluk değerlendirmesi için, son on yılda uygun YKN sayısı ve mekânsal dağılımını belirlemek için çeşitli çalışmalar yürütülmüş olsa da, genel bir kural oluşturulamamıştır ve bu sorun hala devam etmektedir. Bu durumun sebebi, İHA görüntülerinin yöneltmesinden sonra elde edilen nihai ürünlerin doğruluk düzeylerinin çeşitli faktörlerden etkileniyor olmasıdır. Bu faktörler arasında kameranın odak uzaklığı, YÖA, görüntü bloğu yapılandırması, görüntü çözünürlüğü, kullanılan özel yazılım, İHA sistemi yapılandırması ve YKN ölçümünün doğruluğu (hem sahada hem de görüntülerde) vb. sayılabilir. Kontrol noktaları tesisi ve ölçümünün zaman alıcı ve maliyetli faaliyetler olduğunu hatırlatmak gerekir. Alternatif olarak, mevcut GNSS/INS konumlandırma ve yöneltme sistemleri sayesinde doğrudan coğrafi konumlandırma, herhangi bir YKN'ye ihtiyaç

duymadan görüntü dış yöneltme parametrelerinin kolayca türetilmesini sağlayabilir. Ne yazık ki, sınırlı dayanıklılık ve faydalı yük kısıtlamaları nedeniyle; mevcut düşük maliyetli İHA tabanlı haritalama sistemleri genellikle tüketici sınıfı coğrafi referanslama birimleri ve hafif görüntüleme sistemleri ile donatılmıştır. Araştırma sınıfı GNSS/INS birimleriyle karşılaştırıldığında, düşük maliyetli sistemler nispeten küçüktür ve hatalı konum ve yöneltme bilgileri üretmektedir.

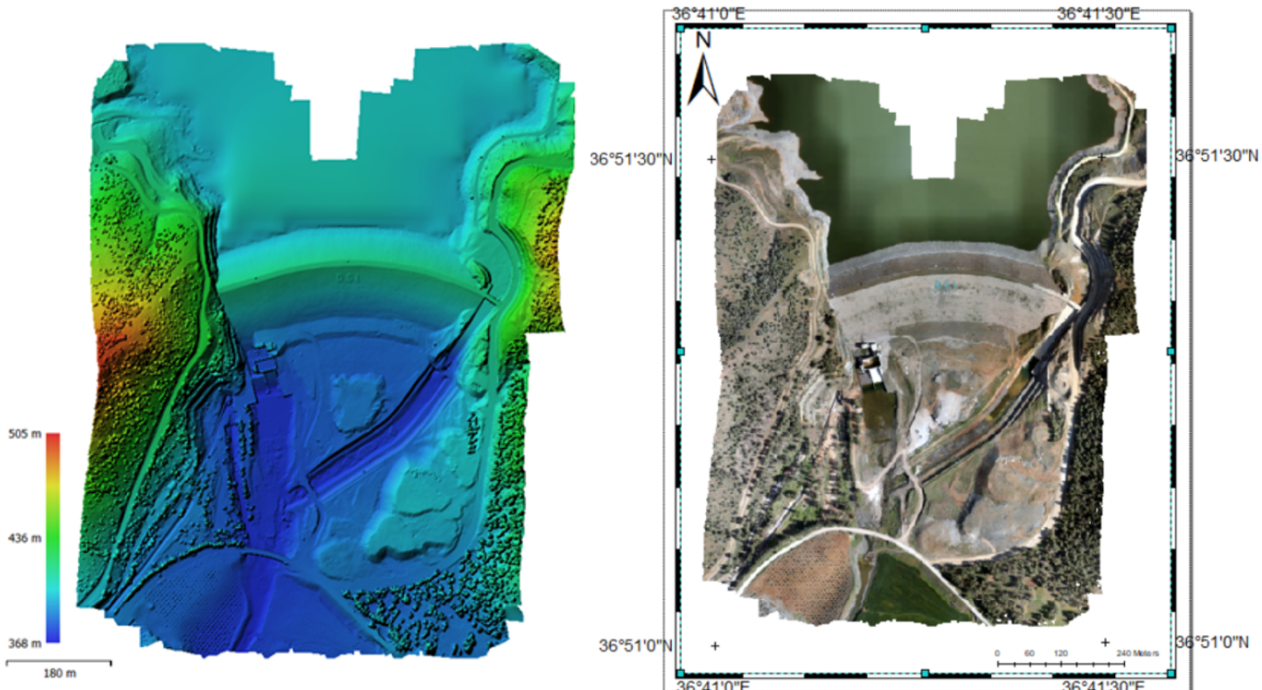
Mevcut ticari yazılımlar, İHA görüntü tabanlı 3B nesne yeniden yapılandırma için SfM sürecini otomatik hale getirmiş olsa da; bazı gelişmekte olan uygulamalar için, hassas İHA tabanlı haritalama işleri hala zorlu bir görev olmaya devam etmektedir. Bunun başlıca nedenlerinden bir tanesi, yukarıda bahsedilen faktörlerin yanında; elde edilen görüntülerin genellikle zayıf veya tekrarlayan doku içermesi ve bunun da ilgili stereo çiftler için karşılıklı yöneltme işleminin çözümünü ciddi şekilde etkileyebilmesidir.

Bu çalışmada kullanılan yazılımın sonuç işlem raporu incelendiğinde; yapılan uçuşla ilgili parametrelere, kamera kalibrasyonu bilgilerine, kamera konumları ile hesaplanan YKN ortalama konum hatalarına ve dijital yükseklik modeli (DEM) ile ortofoto çözünürlük ve doğruluk bilgilerine yer verildiği görülmektedir. Ayrıca görüntü yöneltme, üretilen nokta bulutu, DEM ve ortomozaik ile ilgili bazı 'işlem parametreleri'ne yer verilmektedir. Ancak bu rapor yukarıda anlatılan iş akışında yer alan prosedür ve işlemlerin "metrik kalitesi" yönünden yeterli bilgiye sahip değildir. Kullanıcının, iş akışı içinde kullanılan bir algorithmada elde edilen işlem

sonucunun hangi parametrelere bağlı olarak değiştirilebileceğini/ iyileştirilebileceğini tespit etmesi açık ve kolay değildir. Bu anlamıyla 'kapalı kutu' özelliğinde olduğu söylenebilir.

Yazılım ortamında kullanıcıya sunulan bazı seçenekler (anahtar nokta sayısı sınırlamaları, doğruluk seviyeleri (medium, high vb.) sonuç işlem kalite raporuna yansıyor olsa da bunlar, dijital hava fotogrametrisi blok dengelemesi raporundaki ayrıntılı kalite kontrol bilgileri (ölçütler, hata sınırları, nokta koordinat duyarlılıkları vb.) ile karşılaştırılacak düzeyde değildir.

Fotogrametride geometrik ağ tasarımı, metrik kamera işlemleri, doğruluk optimizasyonu ve hata yayılma yasası, sistematik hata giderme ve uyumsuz ölçü tespiti, sahneden bağımsız kamera kalibrasyonu, güvenilirliği artırmak için fazla ölçü kullanımının benimsenmesi ve fotogrametrik veri işleme sürecinin tüm aşamalarında kalite kontrol prosedürleri gibi mühendislik ilkelerinin tümü kesin, değişmez doğrusal olmayan matematiksel modellerle desteklenirken; SfM tekniğinde karşılaştırılabilir düzeyde benzer prosedürlerin olmayışı dikkat çekicidir. SfM tabanlı kamera konumlandırma ile başlatılan ancak daha sonra fotogrametri ilkelerini takip eden bir veri işleme sürecinin artık SfM değil, aslında standart fotogrametri olduğu da iddia edilebilir. Bir fotogrametri ölçümünü SfM çözümü ile eşdeğer görmek, sadece elde edilen çözümün olduğundan daha az 'metrik' özellikte olduğunu kabullenmek anlamına gelir.



Şekil 7: Çalışmada üretilen sayısal yüzey modeli ve ortofoto harita.

3. Sonuçlar

Günümüzde dijital haritalama uygulamalarında yaygın olarak kullanılan düşük maliyetli, kolay erişilebilir, daha hızlı ve kullanıcıya çeşitli avantajlar sağlayan İHA-fotogrametrisi, 'fotogrametrik bilgisayarlı görü' teknik ve yöntemlerini içeren bir iş akış sürecine sahiptir. Bu kapsamda kullanılmakta olan SfM tekniği, İHA- tabanlı ortofoto harita ve 3B arazi modeli üretiminin standart yöntemi haline gelmiştir. İHA- tabanlı fotogrametriyi geleneksel fotogrametriden ayıran bir özellik de bu teknikten kaynaklanmakta olup, literatürde SFM (veya İHA-SfM) fotogrametrisi olarak da adlandırılmaktadır. Bu ayrıma karşın her ikisi 3B uzaysal nesne modellemesi için tamamen farklı teknolojiler olarak da düşünülemezler. Hem SfM tekniği hem de fotogrametri görüntü tabanlı konumlandırma ve haritalama süreçleridir; her ikisi de değişken geometrik düzenlemelerle bindirmeli çoklu görüntülerin kullanımını içermektedir. Görüntüler arasında karşılıklı yöneltme belirlerken aynı zamanda tek bir koordinat referans çerçevesi içinde 3B nokta bulutu verileri oluştururlar. Her ikisi de aynı analitik ve geometrik kavramlara, aynı fotogrametrik ölçüm sistemlerine ve güvenilir jeo-mekansal konum verileri üretimi için aynı arazi uygulamalarına dayanmaktadır.

SfM tekniği, çok az kullanıcı etkileşimi ile uzaysal kamera konumlandırma ve yöneltme problemini otomatik olarak çözerek, İHA-fotogrametrisini uzman olmayanlar tarafından da jeo-mekansal veri toplamak için kullanımı kolay bir araç haline getirmiştir. Özünde, kamera kalibrasyonu (iç yöneltme), bağlama (tie points) noktaları tespiti, YKN ölçümleri, dış yöneltme için doğrudan GNSS coğrafi konumlandırmasını içeren tüm işlem adımları her ikisi için de aynı olsa bile, İHA-fotogrametrisi kullanıcıları bunu neredeyse hiç fark etmeyebilir. Unutulmamalıdır ki; iyi bir görüntü seti, güvenilir kamera kalibrasyonu, hassas kontrol noktaları veya nitelikli GNSS-IMU tesisleri vb. olmadan, güvenilir fotogrametrik ürünler elde edilemeyecektir. Fotogrametri disiplini hakkında bilgi eksikliğinin veya gerekli bazı temel prosedürlere uyulmamasının, teknolojinin doğru kullanılması halinde bile beklenmeyen veya uygunsuz sonuçlara yol açtığı bilinmektedir.

Bu çalışmada İHA fotogrametrisinde kullanılan süreç ve yöntemlerin geleneksel fotogrametri ile tümüyle özdeş olmadığı bilgisinden hareketle, aralarındaki örtüşme ve benzerlikleri açığa kavuşturmak üzere; yukarıda açıklanan farklı özellikler ve prosedürler göz önünde bulundurularak, birbirine yakın terminolojiye sahip olan bu teknikler kavramsal olarak açıklanmış ve bir pratik uygulama örneği ile analiz edilmiştir.

Bilgilendirme/Teşekkür

Bu çalışmada kullanılan verilerin temininde destek olan KOÜ Harita Müh. Bölümü öğrencileri Hasan Bütüner ve Furkan Kaya ile EFA Harita Müh. Prj. İnş. Taah. Gyr. Değ. Dnş. Ltd. Şti.' ne teşekkürlerimi sunarım.

Yazarların Katkısı

Çalışma tek yazarlıdır. Tüm katkı yazara aittir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., & Martínez-Carricondo, P. (2017). Accuracy of digital surface models and orthophotos derived from unmanned aerial vehicle photogrammetry. *Journal of Surveying Engineering*, 143(2), 04016025.
- Amrullah, C., Suwardhi, D., & Meilano, I. (2016). Product accuracy effect of oblique and vertical non-metric digital camera utilization in UAV-photogrammetry to determine fault plane. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 3, 41-48.
- Balázsik, V., Tóth, Z., & Abdurahmanov, I. (2021). Analysis of Data Acquisition Accuracy with UAV. *Int. J. Geoinf*, 17, 1-10.
- Grayson, B., Penna, N. T., Mills, J. P., & Grant, D. S. (2018). GPS precise point positioning for UAV photogrammetry. *The photogrammetric record*, 33(164), 427-447.
- Boon, M. A., Greenfield, R., & Tesfamichael, S. (2016). Unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetry produces accurate high-resolution orthophotos, point clouds and surface models for mapping wetlands. *South African Journal of Geomatics*, 5(2), 186-200.
- Carbonneau, P. E., & Dietrich, J. T. (2017). Cost-effective non-metric photogrammetry from consumer-grade sUAS: implications for direct georeferencing of structure from motion photogrammetry. *Earth surface processes and landforms*, 42(3), 473-486.
- Carrivick, J. L., Smith, M. W., & Quincey, D. J. (2016). *Structure from Motion in the Geosciences*. John Wiley & Sons.
- Chen, Y., Chen, Y., & Wang, G. (2019). Bundle adjustment revisited. *arXiv preprint arXiv:1912.03858*.

- Clapuyt, F., Vanacker, V., & Van Oost, K. (2016). Reproducibility of UAV-based earth topography reconstructions based on Structure-from-Motion algorithms. *Geomorphology*, 260, 4-15.
- Dandois, J. P., Olano, M., & Ellis, E. C. (2015). Optimal altitude, overlap, and weather conditions for computer vision UAV estimates of forest structure. *Remote sensing*, 7(10), 13895-13920.
- de Haas, T., Ventra, D., Carbonneau, P. E., & Kleinhaus, M. G. (2014). Debris-flow dominance of alluvial fans masked by runoff reworking and weathering. *Geomorphology*, 217, 165-181.
- Dornaika, F., Moujahid, A., El Merabet, Y., & Ruichek, Y. (2016). Building detection from orthophotos using a machine learning approach: An empirical study on image segmentation and descriptors. *Expert Systems with Applications*, 58, 130-142.
- Eisenbeiss, H., & Sauerbier, M. (2011). Investigation of UAV systems and flight modes for photogrammetric applications. *The Photogrammetric Record*, 26(136), 400-421.
- Fonstad, M. A., Dietrich, J. T., Courville, B. C., Jensen, J. L., & Carbonneau, P. E. (2013). Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement. *Earth surface processes and Landforms*, 38(4), 421-430.
- Förstner, W., & Wrobel, B. P. (2016). *Photogrammetric computer vision*. Springer International Publishing Switzerland.
- Gerke, M., & Przybilla, H. J. (2016). Accuracy analysis of photogrammetric UAV image blocks: Influence of onboard RTK-GNSS and cross flight patterns. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*, (1), 17-30.
- Granshaw, S. I., & Fraser, C. S. (2015). Computer vision and photogrammetry: Interaction or introspection?. *The Photogrammetric Record*, 30(149), 3-7.
- Iglhaut, J., Cabo, C., Puliti, S., Piermattei, L., O'Connor, J., & Rosette, J. (2019). Structure from motion photogrammetry in forestry: A review. *Current Forestry Reports*, 5, 155-168.
- Islam, K., Jashimuddin, M., Nath, B., & Nath, T. K. (2018). Land use classification and change detection by using multi-temporal remotely sensed imagery: The case of Chunati wildlife sanctuary, Bangladesh. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 21(1), 37-47.
- Jaud, M., Passot, S., Le Bivic, R., Delacourt, C., Grandjean, P., & Le Dantec, N. (2016). Assessing the accuracy of high resolution digital surface models computed by PhotoScan® and MicMac® in sub-optimal survey conditions. *Remote Sensing*, 8(6), 465.
- Javernick, L., Brasington, J., & Caruso, B. (2014). Modeling the topography of shallow braided rivers using Structure-from-Motion photogrammetry. *Geomorphology*, 213, 166-182.
- Juan, L., & Gwun, O. (2009). A comparison of sift, pca-sift and surf. *International Journal of Image Processing (IJIP)*, 3(4), 143-152.
- Kent, R., Lindsell, J. A., Vaglio Laurin, G., Valentini, R., & Coomes, D. A. (2015). Airborne LiDAR detects selectively logged tropical forest even in an advanced stage of recovery. *Remote Sensing*, 7(7), 8348-8367.
- Kersten, T., & Lindstaedt, M. (2022). UAV-basierte Bildflüge mit RTK-GNSS-brauchen wir da noch Passpunkte. *DVW-Schriftenreihe Band 100/2022*, 39-58.
- Kersten, T., Wolf, J., & Lindstaedt, M. (2022, May). Investigations into the accuracy of the UAV system Dji Matrice 300 Rtk with the sensors Zenmuse P1 and L1 in the Hamburg test field. In *XXIV ISPRS Congress "Imaging today, foreseeing tomorrow"*, 6-11 June 2022, Nice, France (pp. 339-346). Copernicus.
- Kršák, B., Blišfan, P., Pauliková, A., Puškárová, P., Kovanič, L. M., Palková, J., & Zelizňaková, V. (2016). Use of low-cost UAV photogrammetry to analyze the accuracy of a digital elevation model in a case study. *Measurement*, 91, 276-287.
- Lowe, D. G. (2004). Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International journal of computer vision*, 60, 91-110.
- Lucieer, A., Jong, S. M. D., & Turner, D. (2014). Mapping landslide displacements using Structure from Motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography. *Progress in physical geography*, 38(1), 97-116.
- Martínez-Carricondo, P., Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., Mesas-Carrascosa, F. J., García-Ferrer, A., & Pérez-Porras, F. J. (2018). Assessment of UAV-photogrammetric mapping accuracy based on variation of ground control points. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 72, 1-10.
- Mesas-Carrascosa, F. J., Notario García, M. D., Meroño de Larriva, J. E., & García-Ferrer, A. (2016). An analysis of the influence of flight parameters in the generation of unmanned aerial vehicle (UAV) orthomosaics to survey archaeological areas. *Sensors*, 16(11), 1838.
- Micheletti, N., Chandler, J. H., & Lane, S. N. (2015). Structure from motion (SfM) photogrammetry. *Br Soc Geomorphol*.
- Murtiyoso, A., & Grussenmeyer, P. (2017). Documentation of heritage buildings using close-range UAV images: dense matching issues, comparison and case studies. *The Photogrammetric Record*, 32(159), 206-229.
- Naimaee, R., Saadatseresht, M., & Omidalizarandi, M. (2023). Automatic Extraction of Control Points from 3d LIDAR Mobile Mapping and Uav Imagery for Aerial Triangulation. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 10, 581-588.
- Peppas, M. V., Mills, J. P., Moore, P., Miller, P. E., & Chambers, J. E. (2016). Accuracy assessment of a UAV-based landslide monitoring system. *The*

- International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 41, 895-902.
- Prieto, S. A., Adán, A., & Quintana, B. (2020). Preparation and enhancement of 3D laser scanner data for realistic coloured BIM models. *The Visual Computer*, 36(1), 113-126.
- Przybilla, H. J., Bäumker, M., Luhmann, T., Hastedt, H., & Eilers, M. (2020). Interaction between direct georeferencing, control point configuration and camera self-calibration for RTK-based UAV photogrammetry. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 43, 485-492.
- Rangel, J. M. G., Gonçalves, G. R., & Pérez, J. A. (2018). The impact of number and spatial distribution of GCPs on the positional accuracy of geospatial products derived from low-cost UASs. *International Journal of Remote Sensing*, 39(21), 7154-7171.
- Rehak, M., & Skaloud, J. (2015). Fixed-wing micro aerial vehicle for accurate corridor mapping. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2, 23-31.
- Remondino, F., & El-Hakim, S. (2006). Image-based 3D modelling: a review. *The photogrammetric record*, 21(115), 269-291.
- Remondino, F., & El-Hakim, S. (2006). Image-based 3D modelling: a review. *The photogrammetric record*, 21(115), 269-291.
- Reshetyuk, Y., & Mårtensson, S. G. (2016). Generation of highly accurate digital elevation models with unmanned aerial vehicles. *The Photogrammetric Record*, 31(154), 143-165.
- Sanz-Ablanedo, E., Chandler, J. H., Rodríguez-Pérez, J. R., & Ordóñez, C. (2018). Accuracy of unmanned aerial vehicle (UAV) and SfM photogrammetry survey as a function of the number and location of ground control points used. *Remote Sensing*, 10(10), 1606.
- Smith, M. W., Carrivick, J. L., & Quincey, D. J. (2016). Structure from motion photogrammetry in physical geography. *Progress in physical geography*, 40(2), 247-275.
- Snaveley, N., Seitz, S. M., & Szeliski, R. (2008). Modeling the world from internet photo collections. *International journal of computer vision*, 80, 189-210.
- Stöcker, C., Nex, F., Koeva, M., & Gerke, M. (2017). Quality assessment of combined IMU/GNSS data for direct georeferencing in the context of UAV-based mapping. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 355-361.
- Turner, D., Lucieer, A., & Wallace, L. (2013). Direct georeferencing of ultrahigh-resolution UAV imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(5), 2738-2745.
- Ullman, S. (1979). The interpretation of structure from motion. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences*, 203(1153), 405-426.
- Vasuki, Y., Holden, E. J., Kovesi, P., & Micklethwaite, S. (2014). Semi-automatic mapping of geological Structures using UAV-based photogrammetric data: An image analysis approach. *Computers & Geosciences*, 69, 22-32.
- Vautherin, J., Rutishauser, S., Schneider-Zapp, K., Choi, H. F., Chovancova, V., Glass, A., & Strecha, C. (2016). Photogrammetric accuracy and modeling of rolling shutter cameras. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 3, 139-146.
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300-314.
- Wierzbicki, D., Kedzierski, M., & Fryskowska, A. (2015). Assesment of the influence of UAV image quality on the orthophoto production. *The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, 40, 1-8.
- Zhao, B., Li, J., Wang, L., & Shi, Y. (2020, April). Positioning accuracy assessment of a commercial RTK UAS. In *Autonomous Air and Ground Sensing Systems for Agricultural Optimization and Phenotyping V*, 11414, 47-53.
- Zhao, S. (2021). A Commercial PPK Solution for Phantom 4 RTK. *GIM International, Business Guide*, (1), 30-32.



© Author(s) 2023.

This work is distributed under <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>