MERCAN RESİFLERİNİN SUALTI FOTOGRAMETRİSİ İLE 3 BOYUTLU MODELLENMESİ

Fitnat KÖSEOĞLU¹, Sultan KOCAMAN²

¹ Müh., Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, 06800, Ankara, koseoglufitnat@gmail.com

² Doç. Dr., Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, 06800, Ankara, sultankocaman@hacettepe.edu.tr

ÖZET

Moorea IDEA (Island Digital Ecosystem Avatar) Projesi, Pasifik Okyanusu'nda bulunan Moorea Adası'nı laboratuvar olarak kullanarak, ada ekosistemini bütün olarak modellemeyi ve zamansal değişimini izlemeyi hedeflemektedir. Bu projede, Moorea IDEA projesinde belirlenmiş bir test alanında elde edilen veri seti kullanılarak sualtı fotogrametrisi ile mercan resiflerinin 3 boyutlu (3B) modelinin oluşturulması amaçlanmıştır. Sualtında, ışığın farklı bantlarda farklı kırılma indislerine sahip olması ve yansımadan kaynaklı renk değişimleri, görüntü eşlemede ve 3B modellemede sorunlar yaratmaktadır. Kırılma indisinden kaynaklanan sorunları ortadan kaldırmak amacıyla yeni bir çözüm aranmıştır.

Renk dağılımlarını gidermek amacıyla, kalibrasyon çerçevesi görüntüleri mavi, yeşil ve kırmızı bantlarına ayrılarak her bir bant ayrı ayrı kalibre edilmiş, distorsiyonları giderilmiş ve tekrar birleştirilmiştir. Kalibrasyon sonucu oluşturulmuş distorsiyonu giderilmiş görüntüler incelenerek bantlar için kalite karşılaştırması yapılmış ve bu sonuçlardan hareketle tam otomatik olarak nokta bulutu üretilerek 3B model ve ortomozaik oluşturulmuştur.

Anahtar Sözcükler: 3B modelleme, sualtı fotogrametrisi, sualtı kamera kalibrasyonu

ABSTRACT

3D MODELLING OF CORAL REEFS BY USING UNDERWATER PHOTOGRAMMETRY

The Moorea IDEA (Island Digital Ecosystem Avatar) project aims to model the ecosystem of the Moorea Island in the Pacific Ocean and monitor the changes spatiotemporally. The main aim of this study is to reconstruct the coral reefs in 3D in a selected test area by using underwater photogrammetry as part of the Moorea IDEA project. Different refractive indices of visible light bands underwater causes chromatic aberrations in images and results in image matching problems and thus artefacts in 3D model. The approach proposed here aims at eliminating this problem by calibrating the RGB bands separately.

A calibration frame has been used under the water and the calibration frame images have been split into the blue, green and red bands. Afterwards, each band is calibrated individually, and merged again after the removal of the distortions. The quality of the distortion-free images have been investigated and the results have been compared in terms of statistical parameters and visual checks. After the comparison, a 3D model and image orthomosaic have been generated full automatically.

Keywords: 3D modelling, underwater camera calibration, underwater photogrammetry

1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji, insanlara yaşadığımız çevreyle ilgili bilgileri farklı yöntemlerle toplama ve modelleme fırsatları sunmaktadır. Bu alanlardan biri de iki boyutlu fotoğraflar yardımıyla üçüncü boyutun bilgisini çıkarmayı sağlayan fotogrametrik çalışmalardır. Zamanla bu modellerin kullanım alanları da artmıştır. 3B modellemenin kullanım alanlarından bazıları film efektlerinin oluşturulması, akıllı şehir uygulamaları ve şehir modellerinin üretimi, medikal amaçlar için organların modellenmesi, mimari tasarımların modellenmesidir. Sualtını fotoğraflayabilen kameraların üretilmesiyle ise bu alanlara sualtı da eklenmiştir. Bu sayede 3B modelleme deniz altı topografyasının, bitki örtüsünün ve batıkların modellenebilmesi gibi farklı alanlarda da kullanılmaya başlanmıştır.

3B bilgisini kullanarak modelleme yapmak artık birçok farklı alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. 3B modellemenin kullanıldığı alanlara robotik navigasyon ve engel tanıma, artırılmış gerçeklik, mimari araştırma,

adli bilimler örnek verilebilir. Sualtında fotogrametrik yöntemlerin ve optik kameraların kullanımı nispeten yeni bir araştırma alanıdır (Kocaman vd. 2017). Sualtında ışığın farklı bantlarının farklı kırılma indislerine sahip olması, ayrıca yansımadan kaynaklı renk değişimleri ve görüntü eşleştirme sorunları, 3 boyutlu modellemeye zorluklar getirmektedir (Kocaman vd. 2017). Bu nedenle, ışık kırılmalarının neden olduğu bu sorunu gidermek için distorsiyonu giderilmiş görüntüler ile çalışmak, üretilecek modelin doğruluğunu artıracaktır. Optik kameralarla açık havada ve sualtında çekilen fotoğraflar farklı karakteristik özelliklere sahiptir. Bunun temel nedeni ise güneş ışınlarının farklı yoğunluktaki ortamlarda farklı açılarda kırılmasıdır. Bu etkiyi incelemek ve en aza indirmek amacıyla çeşitli yöntemler geliştirilmiştir.

Bu çalışmada, Moorea IDEA Projesi'nin (mooreaidea.org) amaçlarından biri olan, adadaki mercan resiflerinin ölçülerek zamana bağlı değişimlerinin belirlenmesi için bir yaklaşım izlenmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında, kırılma etkisiyle oluşan renk farklılıklarını çözmeye yönelik yeni bir yöntem incelenmiştir. Bu yöntemde renkli fotoğrafları tek seferde kalibre etmek yerine bantlarda kırılmadan dolayı meydana gelen etkileri incelemek amacıyla kameraların her bir bandı ayrı ayrı kalibre edilmiştir. Kalibrasyon sonrasında bu fotoğraflar birleştirilerek sorunun ne derece çözülebileceği değerlendirilmiştir. İkinci aşamada ise, yöntemden varılan çıkarımlar yardımıyla yaklaşık 100 m² lik bir alanın 3B modellemesi yapılmış ve ortomozaïği oluşturulmuştur.

2. MATERYAL VE YÖNTEMLER

2.1 Kullanılan Ekipman

Kamera kalibrasyonu işleminde 46 kontrol noktasına sahip bir taşınabilir kalibrasyon çerçevesi kullanılmıştır (Şekil 1). Kalibrasyon çerçevesinin üretimi ve üzerinde bulunan kontrol noktalarının koordinat ölçümleri Modena Üniversitesi ekibi tarafından yapılmış ve fotoğraf çekimi GoPro Hero4 kamera seti (Şekil 2) kullanılarak sualtı ekibi tarafından Moorea Adası'nda gerçekleştirilmiştir (Capra vd. 2017; Guo vd. 2016; Kocaman vd. 2017; Gruen vd. 2017). Test alanını fotoğraflamak için aynı marka ve model 5 adet GoPro kamera belirli açı ve mesafelerde bir platforma yerleştirilerek çoklu görüntü alabilen bir kamera sistemi oluşturulmuştur. Bu kamera sisteminin oluşturulmasının nedeni, bir çekimde daha geniş alanın fotoğraflanması ve nesnelerin 5 farklı açıdan fotoğraflanabilmesidir. Kullanılan kameranın özellikleri aşağıdaki çizelgede verilmiştir (Çizelge 1).

Şekil 1. Taşınabilir kalibrasyon çerçevesinden iki farklı görünüm.

Şekil 2. 5 adet GoPro kamerayı içeren sualtı kamera sistemi (Kocaman vd. 2017; Gruen vd. 2017).**Çizelge 1.** GoPro Hero4 kamera özellikleri.

Marka	Görüntü boyutu	Odak uzaklığı	Piksel boyutu	Bantlar
GoPro Hero4	3000 x 4000	3.6500 mm	1.55 μ m	Kırmızı, Yeşil, Mavi

2.2 Veri Seti

Bu çalışmada, kamera kalibrasyonu ve mercan resiflerinin modellenmesi için iki farklı veri seti kullanılmıştır. Her iki veri seti de Haziran 2016'da alınmış olup, aynı alanda daha sonra da görüntüler elde edilmiştir (Capra vd. 2017; Gruen vd. 2017). Kullanılan veri seti, beş kameradan oluşan kamera sistemi ile elde edilen multispektral fotoğrafları içermektedir. Mercan resifi alanında fotoğrafların çekim dizisi, test alanının köşesinden başlamak üzere Şekil 3' de gösterildiği gibidir. Şekil 4, GoPro kamera setiyle test alanından alınan bir görüntüyü göstermektedir. Alanda çekim sırasında tesis edilmiş kontrol noktaları bulunmamaktadır. Bu yüzden model sadece lokal bir koordinat sisteminde üretilmiştir.

Şekil 3. Fotoğrafların çekim dizisi. **Şekil 4.** Test alanından alınmış bir görüntü.

2.3 Yazılım

Kamera parametrelerini bulmak amacıyla kullanılan sualtı kalibrasyon nesnesinin kalibrasyonu AustralisPhotometrix 8.1 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Photometrix Australis, 2018). Australis-Photometrix, bir veya birden fazla kamera içeren çok istasyonlu dijital görüntü ağlarından yüksek otomatik 3B koordinat ölçümleri yapmak ve fotogrametrik kamera kalibrasyonu gerçekleştirmek için tasarlanmıştır. Bu yazılımla elde edilen parametreler ve Matlab ortamında (Matlab, 2018) bu çalışma sırasında geliştirilmiş bir kod kullanılarak distorsiyonu giderilmiş görüntüler oluşturulmuştur. Test alanına ait veri setini kullanarak 3B model, ortomozaik üretiminin aşamaları ise Agisoft Photoscan yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Agisoft PhotoScan, dijital görüntülerin fotogrametrik işlemlerini gerçekleştiren ve 3 boyutlu mekânsal veri üreten ticari bir yazılım ürünüdür (Agisoft Photoscan, 2018).

3. KAMERA KALİBRASYONU

Optik kameralarla çekilen görüntülerde çoğunlukla üretimden kaynaklı sistematik hatalar ve farklı tipte distorsiyonlar bulunur. Hassas modelleme gerektiren çalışmalarda bu hataların ve distorsiyonların olabildiğince belirlenmesi ve düzeltilmesi gerekir. Test alanı kullanılarak yapılan kamera kalibrasyonu, bu parametrelerin matematiksel yöntemlerle belirlenmesi amacını taşımaktadır. Fotogrametrik uygulamalarda, kamera kalibrasyonu çoğunlukla odak uzaklığı, asal noktanın konumu, radyal ve teğetsel lens distorsiyonlarını içeren fiziksel parametre seti ile tanımlanır. Sayısal kameraların kalibrasyon yöntemleri hakkında ayrıntılı bir inceleme Remondino ve Fraser (2006) tarafından yapılmıştır.

Sualtı görüntüleme teknolojisi, derin sularda keşif yapılabilmenin elverişli olmasıyla daha popüler hâle gelmiştir. Bununla birlikte, hava ortamıyla karşılaştırıldığında sualtındaki görüşlerde bazı temel farklılıklar vardır (Sedlazeck ve Koch, 2011). Sualtında çekilmiş fotoğraflar kullanılarak yapılan kamera kalibrasyonu, ışığın kırılma etkisinden dolayı oldukça önemlidir. Hava ortamında çekilen fotoğraflar kullanılarak yapılan kalibrasyon ile karşılaştırıldığında, sualtı kamera kalibrasyonu ışığın kamera portu ve su ortamından geçerken zayıflaması nedeniyle kırılan ışık yolundaki küçük hataların potansiyelinden kaynaklanan ek belirsizliğe tabidir. Buna göre, sualtı kalibrasyonunun kesinliği ve doğruluğunun, havadaki eş değer bir kalibrasyona göre düşük olması beklenir (Shortis 2015).

Haziran 2016’da yapılan saha çalışmalarında, İsviçre Federal Teknoloji Enstitüsünde (ETH Zürich) tasarlanan 5 kameralı bir sualtı sistemi kullanılmış ve Modena Üniversitesi tarafından hazırlanan bir sualtı kalibrasyon çerçevesi kullanılarak kameraların kalibrasyonu yapılmıştır. Kalibrasyon sonucunda özellikle farklı bantların farklı kırılmasından kaynaklanan sorunlar görülmüş ve her bir bandın (Kırmızı, Mavi, Yeşil) ayrı ayrı kalibre edilerek farkların incelenmesine karar verilmiştir (Kocaman vd. 2017). Bu bölümün ana amacı, farklı bantlar için kamera kalibrasyon parametrelerini karşılaştırmaktır. Renklerin dağılmasına bir örnek **Şekil 5**'te gösterilmiştir.

Şekil 5. Renk dağılmasına bir örnek.

3.1 Kalibrasyon Objесinin Fotoğraflarının Seçilmesi

Test alanı kalibrasyonunu kullanırken nesne koordinatları (XYZ) bilinen, iyi dağılımlı ve görüntüde hassas şekilde belirlenebilen çok sayıda kontrol noktasına ihtiyaç duyulur. Kontrol noktalarının fotoğraf koordinatlarını kullanarak, iç ve dış yöneltme parametreleri bulunduğundan sonra bu parametreler kullanılarak distorsiyonu giderilmiş görüntüler elde edilebilir (Kraus, 2007). Çekilen çok sayıda görüntü arasından kalibrasyon için kullanılacak görüntülerin seçiminde aşağıdaki kriterler dikkate alınmıştır:

- Çerçeve fotoğrafta geniş bir alanı kaplamalıdır (Şekil 1).
- Çerçeve sabit iken farklı noktalardan görüntüleri alınmış olmalıdır.
- Fotoğrafta görülen noktalar 3B koordinatlara ve birbirinden farklı Z değerlerine sahip olmalıdır.
- Fotoğraflar yeterli bir bindirme oranıyla çekilmiş olmalıdır.

3.2 Kalibrasyon İşlemi

Kamera parametrelerini belirlemek amacıyla kalibrasyon nesnesinin farklı açılardan çekilen görüntüleri kullanılmış, bu görüntüler kırmızı, yeşil ve mavi bantlarına ayrılmış ve toplam 15 fotogrametrik dengeleme projesi oluşturulmuştur. Dengelemede aşağıdaki parametrelerin ön değerleri ağırlıklı bilinmeyenler olarak kullanılmıştır:

- Mevcut kamera parametreleri (odak uzaklığı, CCD piksel boyutu, toplam piksel sayısı)
- Kontrol noktalarının nesne uzayı koordinatları
- Kontrol noktalarının görüntü koordinatları

Dengeleme sonucunda 15 proje için toplam 120 kalibrasyon parametresi kestirilmiştir. Bu 8 parametre Brown (1971) modeline göre tanımlanmış odak uzaklığı (f), asal nokta koordinatları (x_p , y_p), teğetsel distorsiyon parametreleri (p_1 , p_2) ve radyal distorsiyon parametreleridir (k_1 , k_2 , k_3). Kalibrasyon sonuçları incelendiğinde her bant için dengeleme sonucu bulunan odak uzaklığının farklı değerlere sahip olduğu görülmektedir (Şekil 6).

Bu sonuçlara dayanarak her bir kamera için dengeleme sonucunda elde edilen 3 farklı odak uzaklığının ortalaması alınmış ve bu değer her bir bant için sabit kabul edilerek kalibrasyon işlemi tekrarlanmıştır. Her kamera için sabit kabul edilen odak uzaklığı değerleri **Çizelge 2'** de gösterilmiştir.

Şekil 6. Odak uzaklığının her bir bant için kestirilen değerleri.

Çizelge 2. Her bir kameranın sabit olarak kabul edilen odak uzaklığı değerleri (mm).

	Kamera 1	Kamera 2	Kamera 3	Kamera 4	Kamera 5
Odak Uzaklığı (f)	3.66	3.67	3.65	3.65	3.64

Odak uzaklığının her bant için sabit alındığı ikinci dengeleme işlemi sonrasında kestirilen kalibrasyon değerleri kullanılarak distorsiyonu giderilmiş görüntüler oluşturulması amaçlanmıştır. Distorsiyonu giderilmiş görüntüleri oluşturmak için Matlab ortamında bir kod geliştirilmiş ve kalibrasyon sonucu elde edilen parametreler, kullanılan formüllerde girdi olarak kullanılmıştır. Düzeltilmiş görüntü koordinatları $x(corr)$ ve $y(corr)$, aşağıdaki formüller kullanılarak hesaplanmıştır. $x(meas)$ ve $y(meas)$ ölçülen görüntü koordinatlarını ifade etmektedir. Distorsiyon formülleri Australis-Photometrix yazılımının kullanım kılavuzunda verildiği şekilde kullanılmıştır.

$$\begin{aligned}
 x &= x(meas) - xp \\
 y &= y(meas) - yp \\
 r^2 &= x^2 + y^2 \\
 dr &= K1 * r^2 + K2 * r^4 + K3 * r^6 \\
 x(corr) &= x(meas) - xp + x * dr + P1 * (r^2 + 2x^2) + 2 * P2 * x * y \\
 y(corr) &= y(meas) - yp + y * dr + P2 * (r^2 + 2y^2) + 2 * P1 * x * y
 \end{aligned}$$

Distorsiyonu giderilmiş görüntülerde, en yakın komşu yaklaşımı (nearest neighbour) yeni gri değerlerini düzeltilmiş görüntü koordinatlarına karşılık gelen piksellere atamak için kullanılmıştır. Distorsiyonlu ve distorsiyonu giderilmiş görüntüler boyut farklılıklarına sahip olduğundan, en yakın komşu algoritması uyguladıktan sonra, gri değeri atanmamış pikseller için interpolasyon yöntemi kullanılmıştır.

3.3 Kalibrasyon Sonuçları

Sabit ve değişken odak uzaklığına sahip iki proje setinin sonuçları görsel olarak yorumlandığında, distorsiyonu giderilmiş görüntülerde kromatik dispersiyon miktarında anlamlı bir fark olmadığı görülmüştür. Bu nedenle modelleme işlemi için ham görüntülerin kullanılmasına karar verilmiştir. Ham görüntülerdeki renk dağılımı ve mavi bandın iki farklı odak uzaklığı kullanılarak distorsiyonu giderilmiş görüntüleri sırasıyla Şekil 7 ve Şekil 8' de gösterilmektedir. Her bandın kendi odak uzaklığı kullanılarak oluşturulan 15 projenin kalibrasyonundan elde edilen parametreler Şekil 6, 9, 10, ve 11'de gösterilmiştir. Dengeleme sonucunda elde edilen piksel birimlerindeki σ_0 değerleri ise Çizelge 3'te verilmiştir.

Şekil 12, farklı bantlar için ham görüntülerde renk dağılmasını göstermektedir. Şekil 13, aynı bölge için distorsiyonu giderilmiş görüntülerdeki renk dağılma miktarını göstermektedir.

Şekil 7. Ham görüntüdeki renk dağılımı.

a)

b)

Şekil 8. Mavi bandın a) tek bandın kalibrasyonu ile elde edilmiş odak uzaklığı ile düzeltilmiş b) üç bandın odak uzaklığı ortalaması kullanılarak düzeltilmiş görüntüsü.

Şekil 9. Asal nokta koordinatlarının kalibrasyon sonucu elde edilen değerleri.

Şekil 10. Teğetsel distorsiyon parametrelerinin kalibrasyon sonucu elde edilen değerleri.

Şekil 11. Radyal distorsiyon parametrelerinin kalibrasyon sonucu elde edilen değerleri.

Çizelge 3. Dengeleme sonucunda elde edilen σ_{m0} değerleri (birim: piksel).

σ_{mao} (pixel)	Kamera-1	Kamera-2	Kamera-3	Kamera-4	Kamera-5
Mavi	1.57	1.16	0.74	0.73	0.52
Yeşil	1.44	1.13	0.75	0.58	0.63
Kırmızı	1.40	1.03	0.74	0.63	0.69

a) Mavi

b) Yeşil

c) Kırmızı

Şekil 12. Ham görüntünün farklı bantlarında renk dağılımı.

a) Mavi

b) Yeşil

c) Kırmızı

Şekil 13. Distorsiyonu giderilmiş görüntünün farklı bantlarında renk dağılımı.

4. 3B MODEL OLUŞTURMA

3B modelleme için öncelikle çekilen çok sayıda fotoğraf arasından hangilerinin kullanılacağı belirlenmiştir. Agisoft Photoscan yazılımında oluşturulan 3B modelin genel iş akışı aşağıdaki gibidir. Şekil 14, test alanında oluşturulmuş 3 boyutlu modele ait bir görünümü göstermektedir.

Görüntü yoneltme → Yoğun nokta bulutu üretimi → Ağ (TIN) model üretimi → Giydirilmiş (textured) model üretimi → Ortomozaik üretimi

Şekil 14. Mercan resiflerinin 3B modeli.

5. SONUÇ

Bu projede, renk dağılması sorunlarını düzeltmek için görüntü bantları ayrı ayrı kalibre edilmiş, distorsiyonu giderilmiş bantlar tekrar birleştirilmiş ve bu yöntemin sonuçları incelenmiştir. Proje kapsamında, Pasifik Okyanusu'ndaki Moorea adasında 100 m²'lik bir alanda mercan resiflerinin 3B modeli ve ortomozaifi üretilmiştir.

Ham ve distorsiyonu giderilmiş görüntüler görsel olarak yorumlandığında, distorsiyonu giderilmiş görüntülerde kromatik dağılma miktarında anlamlı bir fark olmadığı görülmüştür. Bu nedenle, distorsiyonu giderilmiş görüntülerin oluşturulması ve 3B modelleme aşamasında her bir bantın odak uzaklığının ayrı kestirildiği dengelemelerden elde edilen parametreler kullanılmıştır.

Projede kullanılan yöntem sonucunda elde edilen RGB görüntülerde, kromatik dağılma probleminin tamamen çözülmediği ancak bir dereceye kadar iyileştirilebildiği gözlemlenmiştir. Şekil 15, kalibrasyon çerçevesinin ham ve distorsiyonu giderilmiş görüntülerini göstermektedir.

a) Ham görüntü

b) Distorsiyonu giderilmiş görüntü

Şekil 15. Kalibrasyon cisminin ham ve distorsiyonu giderilmiş görüntüleri.

Kırmızı, yeşil ve mavi bantlar karşılaştırıldığında ise, yeşil bantın daha keskin görüntü sağladığı gözlenmiştir (Şekil 12 ve 13). Sonuç olarak, bu proje verileri için en iyi görüntülerin yeşil bantta elde edildiği düşünülmektedir.

Projede bir sonraki adım olarak, kalibre edilen görüntülerin ölçek farklılıklarının giderilerek bantların birleştirilmesiyle kromatik dispersiyonun tamamen ortadan kaldırılması planlanmaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Hacettepe Üniversitesi BAP Koordinasyon Birimi tarafından FUA-2016-9989 kodlu proje ile desteklenmiştir. Yazarlar ayrıca Moorea IDEA Konsorsiyumu'na (mooreaidea.org), özellikle Prof. Dr. Armin Gruen ve Prof. Dr. Matthias Troyer'a veri sağladıkları için ve Melbourne Üniversitesinden Prof. Dr. Clive Fraser'a Australis yazılımının kullanımına imkân verdiği için teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

Agisoft Photoscan, 2018. <http://www.agisoft.com/> [Erişim tarihi: 11.05.2018]

Brown, D.C., 1971. Close-Range Camera Calibration. *Photogrammetric Engineering*, 37(8):855–866.

Capra, A., Castagnetti, C., Dubbini, M., Gruen, A., Guo, T., Mancini, F., Neyer, F., Rossi, P. Troyer, M., 2017. High accuracy underwater photogrammetric surveying In: *Proceedings of the 3rd IMEKO International Conference on Metrology for Archaeology and Cultural Heritage*, MetroArcheo 2017. October 23-25, 2017, Lecce, Italy.

Guo, T., Capra, A., Troyer, M., Grün, A., Brooks, A. J., Hench, J. L., Dubbini, M., 2016. Accuracy assessment of underwater photogrammetric three dimensional modelling for coral reefs. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 41, 821.

Gruen, A., Kocaman, S., Guo, T., Ural, S., Troyer, M., 2017. DSM/DTM – Related Investigations Of The Moorea Avatar Project. *38th Asian Conference on Remote Sensing*, October 23-27, New Delhi, India.

Kocaman, S., Guo, T., Gruen, A. ve Troyer, M., 2017. Ada Dijital Ekosistem Avatari (IDEA) Projesi. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 17(Özel Sayı): 183-189.

Koch, R., Sedlazeck, A., 2011. Calibration of Housing Parameters for Underwater Stereo-Camera Rigs. *British Machine Vision Conference BMVC 2011*, Dundee, Scotland.

Kraus, K., 2007. Photogrammetry: geometry from images and laser scans, The Kluwer Academic Publishers, Berlin Walter De Gruyter, Berlin.

Matlab, 2018. <https://www.mathworks.com/> [Erişim tarihi: 11.05.2018]

Photometrix Australis, 2018. <http://www.photometrix.com.au/australis/> [Erişim tarihi: 11.05.2018]

Remondino F. and Fraser C. 2006. Digital camera calibration methods: considerations and comparisons. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and the Spatial Sciences*, 36(5), pp. 266-272.

Shortis, M., 2015. Calibration Techniques for Accurate Measurements by Underwater Camera Systems. *Sensors* (2015), Busan, South Korea, 30810-30827.