

POPÜLER KAMERA KALİBRASYONU YAZILIMLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

E. Özdemir^a, Z. Duran^a

^aİTÜ, İnşaat Fakültesi, 34469 Maslak Sarıyer İstanbul, Türkiye – (ozdemiremr, duranza)@itu.edu.tr

ANAHTAR KELİMELER: Fotogrametri, kamera kalibrasyonu, kamera kalibrasyonu yazılımları

ÖZET:

Kamera kalibrasyonu, dijital kameraların yaygınlaşması ve fotogrametriyle birlikte bilgisayarla görme alanında da kullanılması sebebiyle günümüzde daha yaygın olarak yapılmaktadır. Önceleri, kalibrasyon işlem adımlarının tamamı manuel olarak yapılmaktayken, günümüzde kullanılan yazılımlar ile kalibrasyon alanının oluşturulmasından hesaplamalara kadar pek çok işlem adımı otomatik olarak yapılmaktadır. Bunun sonucu olarak, bu konuda daha az yetkin kişilerin de kolayca kamera kalibrasyonu yapabilmesi mümkün olmuştur. Ancak, yüksek seviyede otomasyon sebebiyle doğruluk ve hassasiyetten ödün verilebilmektedir. Bu durumda ise oluşturulan modelin doğruluk ve hassasiyetinin düşük olması kaçınılmazdır. Bu çalışma kapsamında kamera kalibrasyonu için kullanılan MATLAB, Agisoft Lens, 3D Flow Zephyr Pro ve PhotoModeler Scanner (PMS) yazılımları karşılaştırılmıştır. Yazılımların kendi içindeki kalibrasyon alanı opsiyonlarının kalibrasyon sonuçlarına etkisi de incelenmiştir. MATLAB ve Agisoft Lens yazılımlarında farklı genişlikte kareler ağı kullanılmış, PMS yazılımında tek kâğıt ve çoklu kâğıt ile kalibrasyon yapılmış, Agisoft Lens yazılımıyla kalibrasyon için çekilen görüntüler MATLAB ortamında da değerlendirilmiştir. Kullanılan kamera için üretici tarafından 4.15 mm olarak belirtilen odak uzaklığı bilinebilen tek parametre olması nedeniyle karşılaştırma için kullanılmıştır. Yapılan farklı çalışmalarda odak uzaklığı MATLAB ortamında 4.16-4.27 mm aralığında, Agisoft Lens yazılımıyla 4.18-4.25 mm, 3DF Zephyr yazılımıyla 4.23 mm ve PMS yazılımıyla 4.38-4.42 mm aralığında hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar dikkate alındığında MATLAB yazılımının diğerlerinden daha yüksek doğrulukla kamera kalibrasyonu işlemi gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir. Ek olarak, bazı yorumlarda bulunulmuştur.

KEY WORDS: Photogrammetry, camera calibration, camera calibration software

ABSTRACT:

Camera calibration is more widely used than before, due to widespread availability of digital cameras and their usage in computer vision applications as well as photogrammetry. In the previous decades, almost all the processes are needed to be completed manually. Yet, with the aid of current commonly used software, from generation of calibration field to calculations, almost all the progress can be handled automatically. Consequently, calibration process is eased even for underqualified people. However, such high level of automation comes with the cost of lower accuracy and precision. This leads to lower accuracy and precision for the 3D model, too. In this study, MATLAB, Agisoft Lens, 3D Flow Zephyr Pro and PhotoModeler Scanner (PMS) software, which are popular for camera calibration, are compared. Taking advantage of flexible calibration fields, the effects of changes in calibration fields are also examined. These flexibilities are; different size of grids for MATLAB and Agisoft Lens, single-sheet and multi-sheet calibration for PMS. In addition, AgiSoft Lens's calibration field is computed using MATLAB. Focal length is chosen to compare these software as it is the only known parameter manufacturer provides as 4.15mm. The focal length is calculated by MATLAB between 4.16-4.27mm, by Agisoft Lens as 4.18-4.25mm, by 3DF Zephyr 4.23mm, and by PMS between 4.38-4.42mm. According to results, MATLAB is seen as the software, which provides better results among others. In addition, some inferences are shared.

1. GİRİŞ

Gelişen teknolojiyle birlikte üç boyutlu (3B) sayısal modellere olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Yer yüzeyinin modellenmesinin yanı sıra, kullanılan navigasyon haritalarının yerini 3B şehir modellerine bırakması, yaygınlaşmaya başlayan artırılmış gerçeklik ve sanal gerçeklik uygulamaları, sanal müzeler, tarihi eserlerin dokümantasyonu, endüstriyel uygulamalar ve benzeri pek çok farklı alanda 3B modeller kullanılmaktadır.

Mevcut objelerin yüksek doğruluklu 3B modellerinin üretilmesi için fotogrametri yöntemi yaygın olarak tercih edilmektedir. Yüksek doğruluğa ihtiyaç duyulmadığında ise daha düşük maliyetli olan fotogrametrik hareket ile nesne oluşturma (*Structure from Motion / SfM*) yöntemine başvurulmaktadır. Her iki durumda da kullanılacak kamera kalibrasyonu ya çalışma öncesinde ya da çalışma sırasında yapılmaktadır. Kamera kalibrasyonunun doğruluğu ise oluşturulacak olan model

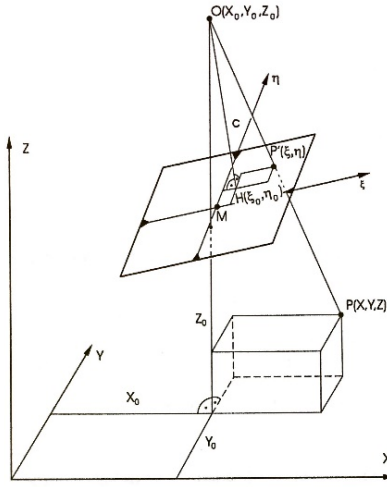
doğruluğunu doğrudan etkilemektedir. Bu sebeple mümkün olan en yüksek doğrulukla yapılması hedeflenmektedir.

Bu çalışma kapsamında, kamera kalibrasyonu işlevi olan popüler yazılımlar kullanılarak kalibrasyon yapılmış, sonuçlar karşılaştırılmış ve bazı yorumlar yapılmıştır. Yazılımların sunduğu özelleştirilebilir test alanlarından faydalanılarak sonuçları karşılaştırılmıştır.

1.1 Fotogrametri

Fotogrametri, kısaca, var olan bir obje veya çevreye ait görüntülerin kayıt edilmesi, ölçülmesi ve yorumlanması ile hakkında güvenilir bilgilerin elde edildiği bilim, teknoloji ve sanatı olarak tanımlanmaktadır. Tarihi eserlerin kayıt altına alınması (Duran ve Aydar, 2012), yer yüzünün 3B modellenmesi (Nex ve Remondino, 2014) ve objelerle temasta bulunmadan ölçme yapılması gereken farklı durumlarda (Linder, 2009) fotogrametri yaygın olarak kullanılmaktadır.

Fotogrametri tekniği, tek görüntü ile iki boyutlu (2B) değerlendirme için kullanılabilirliği gibi genellikle resim çiftleri ile 3B değerlendirme için kullanılmaktadır. Stereofotogrametri olarak anılan bu yaklaşımın temelini oluşturan kolinearite (doğrusallık) koşulu Şekil 1 ve 1 numaralı eşitliklerle ifade edilir.



Şekil 1. Kolinearite koşulu, resim ve cisim koordinatları

Şekil 1'de (X, Y, Z) cisim koordinat sistemi, (ξ, η) ise resim koordinat sistemini göstermektedir. O (X₀, Y₀, Z₀) izdüşüm merkezi olup, resmin çekildiği noktayı temsil eder. c, kalibre edilmiş odak uzaklığını, H (ξ₀, η₀) resim ana noktasını, M resim orta noktasını, P(X, Y, Z) P noktasının cisim uzayı koordinatlarını, P'(ξ, η) ise P noktasının resim koordinatlarını belirtir. Kolinearite koşulu ise O, P ve P' noktalarının bir doğru üzerinde olması olarak tanımlanır. Bu koşul aşağıdaki eşitlikler (1) ile matematiksel olarak ifade edilmektedir. Burada r_{ij} dönme matrisi R'nin elemanlarıdır. (Kraus, 2007)

$$\begin{aligned}\xi &= \xi_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \\ \eta &= \eta_0 - c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}\end{aligned}\quad (1)$$

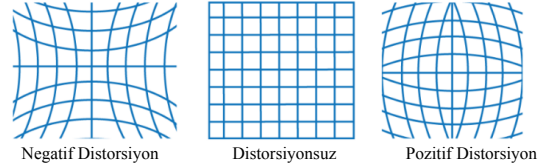
1.2 Kamera Kalibrasyonu ve Parametreler

Kamera kalibrasyonu işlemi, kameranın iç yöneltme parametrelerinin elde edilmesi için yapılır. Kalibrasyon sonucunda elde edilen bu parametrelerle, uzaysal ışın demeti izdüşüm merkezini resim düzlemine göre sabitlemiş olur.

1.2.1 İç Yöneltme Parametreleri: İç yöneltme parametreleri, kalibre edilmiş odak uzaklığı c, resim ana noktası koordinatları H(ξ₀, η₀) ve distorsiyon parametreleridir. Distorsiyon parametreleri ise radyal ve teğetsel distorsiyonu modellemek için kullanılan katsayılardır.

Optik sistemlerde olduğu gibi, fotogrametride de odak uzaklığı f ile gösterilir. Fakat, kamera kalibrasyonu ile hesaplanan c ile aralarında bir fark mevcuttur. f, lensin sonsuza odaklandığında oluşan, c ise diğer odaklamalarda oluşan odak uzaklıklarıdır. Lensin her bir odaklanmasında meydana gelen c değerindeki bu değişim ise yüksek hassasiyetle hesaplanması için önemli bir sebeptir. c değerindeki değişikliğin hesaplanan koordinatlara etkisi (1) numaralı eşitliklerle görülebilir. Ayrıca, kamera iç geometrisinin odaklanılan mesafeye göre değişimini inceleyen çalışmalar da bulunmaktadır (Sanz-Abianedo vd., 2012).

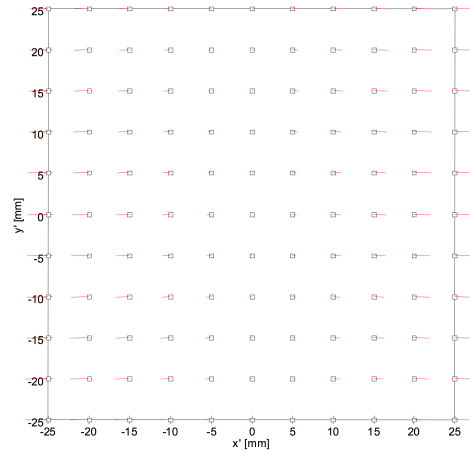
Radyal distorsiyon, mercekten kaynaklı açısal büyütme sonucu merceğe farklı açılarla gelen ışınların, izdüşüm düzlemi önünde veya arkasında odaklanmasıyla meydana gelen görüntü ötelenmesidir. Radyal distorsiyonun konumsal etkisi fazla olduğu için yüksek doğrulukla modellenmesi gerekir. Bu sebeple de çoğu çalışmada en az iki katsayı ile çözülmektedir. Radyal distorsiyonun görüntü üzerindeki etkisi Şekil 2'de gösterilmekte ve 2 numaralı eşitliklerle matematiksel olarak ifade edilmektedir. Eşitliklerde (2) δr öteleme miktarı, K_n radyal distorsiyon katsayılarıdır.



Şekil 2. Radyal distorsiyonun görüntüye etkileri (MathWorks, 2017a)

$$\begin{aligned}\delta r_{rad} &= K_1 r^3 + K_2 r^5 + K_3 r^7 \\ r^2 &= \xi^2 + \eta^2\end{aligned}\quad (2)$$

Teğetsel distorsiyon ise lens elementleri ve görüntü sensörünün merkezlerinin çakışık olmaması ve bunların düzlemlerinin paralel olmamasından kaynaklanmaktadır. Görüntü üzerindeki etkisi aşağıdaki şekilde gösterilmiştir. (Luhmann vd., 2014)



Şekil 3. Teğetsel distorsiyon ve görüntüye etkileri

Şekil 3'teki x' ve y' eksenleri, sırasıyla Şekil 1'deki ξ ve η'yı temsil etmektedir. Teğetsel distorsiyonun matematiksel olarak ifade edilmesi aşağıdaki eşitliklerde (3) gösterilmiş olup, P_n teğetsel distorsiyon katsayılarını temsil etmektedir.

$$\begin{aligned}\delta \xi_{tan} &= P_1(r^2 + 2\xi^2) + 2P_2\xi\eta \\ \delta \eta_{tan} &= P_2(r^2 + 2\eta^2) + 2P_1\xi\eta\end{aligned}\quad (3)$$

1.2.2 Kamera Kalibrasyonu Yöntemleri: Kalibrasyon yöntemleri, işlemin yapıldığı ortama ve kullanılan referans objesine göre değişmekte olup, altı başlıkta incelenmektedir (Luhmann vd., 2014).

Laboratuvar ortamında kalibrasyon: Daha çok metrik kameralar için kullanılmıştır. Bu yöntemde goniometre, kolimatör veya farklı optik araçlarla, gelen ışınların doğrultularından yararlanılarak iç yöneltme parametreleri çözülür. Son kullanıcı tarafından pratikte uygulanamamaktadır. Günümüzde az kullanıldığı düşünülmektedir.

Test alanı kalibrasyonu: Bu yöntemde koordinatları veya birbirlerine olan mesafeleri bilinen belirli noktalardan yararlanılır. Test alanının farklı açılardan görüntüleri alınarak değerlendirilir. Test alanı taşınabilir veya sabit olabilmektedir.

Çekül hattı kalibrasyonu: Bu yöntemde çok sayıda düz çizgi ile bir test alanı oluşturulur. Çizgilerin düz olduğundan emin olunması için çeküllerden yararlanılır. Distorsiyon haricinde herhangi iç veya dış yöneltme parametresi çözülmemektedir.

Çekim sırasında kalibrasyon: Bu yöntemde, çalışmaya konu alana bir test alanı tesis edilerek kalibrasyon gerçekleştirilir. Test alanına tesis edilen kontrol noktaları hem kalibrasyon hem de dış yöneltme parametrelerinin çözülmesi için kullanılacağından, gerekenden daha fazla sayıda tesis edilmelidir.

Kendine özgü kalibrasyon: Çekim sırasında kalibrasyon yönteminin bir uzantısı olarak görülebilen bu yöntemde koordinatları bilinen kontrol noktalarına ihtiyaç yoktur. Modellenecek obje için yapılan resim ölçmeleri ile kalibrasyon işlemi gerçekleştirilir. Bu yöntemde iç yöneltme parametreleri, hesaba katılan her bir resim ile güncellenir. Dış yöneltme ise, her bir resim için kullanılacak referans noktaları ile hesaplanabilmektedir. Oluşan 3B modeli ölçeklendirmek için obje uzayından bilinen bir (veya doğruluğu arttırmak için birden fazla) uzunluk için resim ölçmeleri gerçekleştirilerek hesaba dahil edilebilir. Modellenecek objenin yöntem için uygun olmaması veya farklı kameraların kullanılması durumunda ise diğer kalibrasyon yöntemlerinden birinin kullanılması gerekmektedir.

Sistem kalibrasyonu: Bu yöntem iç ve dış yöneltme parametrelerinin çok kameralı sistemlerde çözümünde kullanılır. Özellikle dış yöneltme parametrelerinin ortak bir koordinat sisteminde çözülebilmesi açısından oldukça önemlidir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışma kapsamında kamera olarak bir akıllı telefon kamerası kullanılırken, yazılım olarak ise MATLAB, Agisoft Lens, PMS, 3DF Zephyr Pro kullanılmıştır.

Yazılımların çekim esnasında kalibrasyon ve kendine özgü kalibrasyon gibi yöntemler ile işlem yapma yetenekleri göz ardı edilerek, yalnızca kendi içindeki test alanlarıyla kalibrasyon kabiliyetleri değerlendirilmiştir.

2.1 Kullanılan Materyaller

Kamera: Çalışma için kullanılan akıllı telefon kamerasının teknik özellikleri aşağıdaki tabloda belirtildiği gibidir.

Cihaz İsmi	iPhone 6S
Kamera Çözünürlüğü	4032x3024 piksel
Sensör Boyutları*	~ (4.92x3.69)mm ²
Odak Uzaklığı	4.15mm
Piksel Boyutu	1.22µm
*Üretici tarafından verilen piksel boyutuyla hesaplanmıştır.	

Tablo 1. Kullanılan kameranın teknik özellikleri

MATLAB: MATLAB yazılımı elektronik devre simülasyonundan haritacılık hesaplamalarına kadar farklı amaçlar için kullanılmaktadır. Platformda popüler uygulama alanlarından biri olan bilgisayarla görme için sunulan araç kutusuyla gelen kamera kalibrasyonu programı, test alanı kalibrasyonu gerçekleştirmektedir.

Agisoft Lens: Agisoft tarafından geliştirilen program, bir fotogrametrik değerlendirme yazılımı olan Agisoft PhotoScan'ın yanında sunulmaktadır. Kullanılan test alanı bilgisayarın ekranına yansıtılmaktadır.

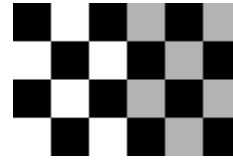
PhotoModeler Scanner: Fotogrametrik 3B modelleme yazılımı olan PMS, içerisinde kalibrasyon aracı barındırmaktadır. Bu araç ile tek kâğıt ve çoklu kâğıt kalibrasyonları yapılabilmektedir. Çoklu kâğıt yöntemi kullanılarak farklı boyutlarda test alanı oluşturulabilmektedir.

3DF Zephyr: Fotogrametrik değerlendirme yazılımı olan 3DF Zephyr, içerisinde kamera kalibrasyonu aracı sunmaktadır. Program test alanını bilgisayar ekranında oluşturmaktadır.

2.2 MATLAB ile Kamera Kalibrasyonu

MATLAB'ın bilgisayarla görme araç kutusuyla birlikte gelen kamera kalibrasyonu uygulaması tek veya stereo kamera kalibrasyonu yapabilmektedir. Program gerekli hesaplamalar için Microsoft Araştırma Merkezi (Zhang, 2000) ve Oulu Üniversitesi adresli (Heikkila ve Silven, 1997) çalışmalardan yararlanmaktadır (MathWorks, 2017b).

Program test alanı olarak dama tahtası görüntüsü ile çalışmaktadır. Yazılımın içinde yer alan checkerboard fonksiyonuyla farklı boyutlarda ve nokta sayılarında dama tahtası görüntüsü oluşturulabilmektedir. 10 piksel boyutlu, 2 satır, 3 sütun test alanı örneği Şekil 4'teki gibidir.



Şekil 4. MATLAB kalibrasyon test alanı

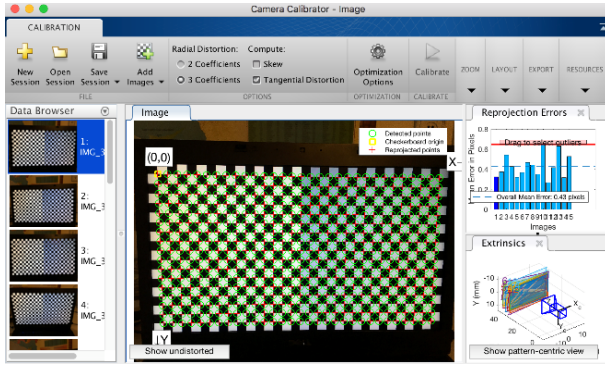
Dama tahtası görüntüsünün sol yarısının siyah-beyaz, sağ yarısının siyah-gri olmasının sebebi ise koordinat sisteminin tanımlanabilmesidir.

MATLAB programında test alanı olarak farklı satır ve sütun sayılarında dama tahtası görüntüleri kullanılmıştır. MATLAB'ın kendi test alanına ek olarak, Agisoft Lens programıyla oluşturulan test alanları da MATLAB ortamında değerlendirilmiştir. Kullanılan farklı dama tahtası görüntülerinin özellikleri aşağıda Tablo 2'de belirtildiği gibidir.

Set No	Resim Çekme Mesafesi (cm)	Karenin Bir Kenarı (cm)	Satır x Sütun Sayısı
1. Set	35	2.41	4x7
2. Set	35	1.09	9x16
3. Set	35	0.55	18x32
4. Set (Agisoft)	35	0.9	10x19
5. Set (Agisoft)	35	1.6	6x10

Tablo 2. MATLAB'de kalibrasyon için kullanılan test alanları

MATLAB ortamında yapılan çalışmalarda test alanları bilgisayar ekranına yansıtılmıştır. Çekilen resimler cameraCalibrator komutuyla çalıştırılan kamera kalibrasyonu grafik ara yüzü ile değerlendirilmiştir. Yazılım girdi olarak resimleri ve dama tahtasındaki bir karenin bir kenarının gerçek dünya uzunluğu değerini istemektedir.

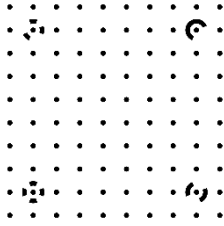


Şekil 5. MATLAB kamera kalibrasyon aracı grafik ara yüzü

Yazılım kalibrasyon işlemini tamamladığında sonuçları ve hataları birer değişken içerisinde MATLAB çalışma alanına göndermektedir. Sunulan değerler piksek sayısı cinsindedir.

2.3 PhotoModeler Scanner ile Kamera Kalibrasyonu

PMS yazılımı test alanı ile kalibrasyon işlemini birbirine benzer iki yöntemle sunmaktadır. İlki tek kâğıt, ikincisi ise çoklu kâğıt ile kalibrasyondur. Tek kâğıt kalibrasyonu A0 veya A4 boyutlarında bir kâğıda test alanının çıktısı alınarak yapılmaktadır. Çoklu kâğıt ile kalibrasyonda ise A4 boyutunda pek çok sayıda kâğıda çıktı alınarak çalışılmaktadır. Çekilen resimler aktarıldığında, hangi tip kalibrasyon yapılacağı yazılım tarafından algılanarak değerlendirmeye başlanmaktadır.



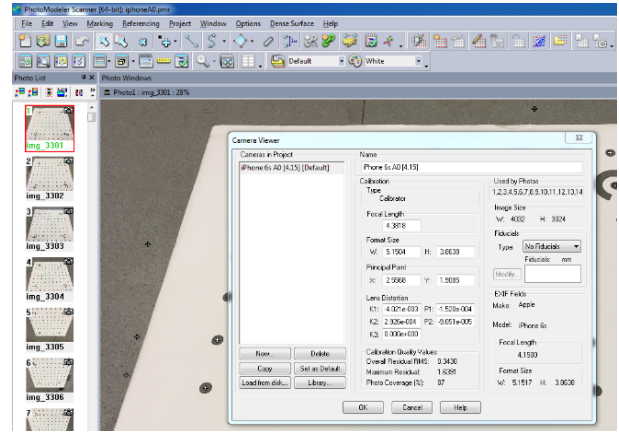
Şekil 6. PMS kalibrasyon test alanı (A4)

Tek kâğıt kalibrasyonunda A4 boyutu için 10x10, A0 boyutu için 12x12 adet kontrol noktası bulunmaktadır. Çoklu kâğıt kalibrasyonunda ise her bir A4 için 5 adet kontrol noktası vardır. Çalışmada kullanılan test alanları Tablo 3'te belirtilmiştir.

Set	Resim Çekme Mesafesi (m)	Karenin Bir Kenarı (cm)	Kontrol Noktası Sayısı
Çoklu Kâğıt	2.5	1.5	9 kâğıt x5
Tek Kâğıt A4	0.35	0.3	10x10
Tek Kâğıt A0	1	3	12x12

Tablo 3. PMS kamera kalibrasyonu test alanları

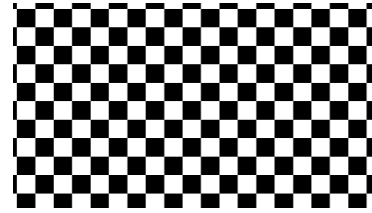
Çalışma kapsamında çok kâğıtla kalibrasyon ve A0 boyutundaki tek kâğıtla kalibrasyon yöntemleri için kâğıt çıktılar kullanılmış, A4 boyutundaki tek kâğıtla kalibrasyon için ise bilgisayar ekranı kullanılmıştır. Programın ekran alıntısı Şekil 7'da gösterilmiştir. Kalibrasyon sonuçları yazılımın kendine özel uzantısı ile bir dosyada tutulmakta olup parametreler metrik sistemde verilmektedir.



Şekil 7. PMS Kalibrasyon Sonuçları Ekranı

2.4 Agisoft Lens ile Kamera Kalibrasyonu

Agisoft Lens yazılımında kamera kalibrasyonu bilgisayar ekranına yansıtılan test alanı ile yapılmaktadır. Test alanı dama tahtası şeklinde olup boyutu değiştirilebilmektedir. Test alanından alınan ekran görüntüsü Şekil 8'deki gibidir.



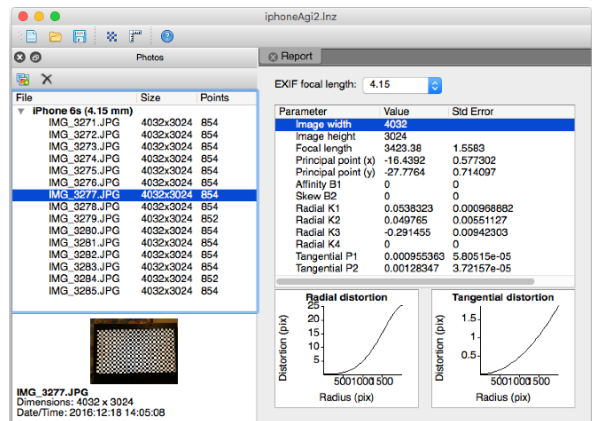
Şekil 8. Agisoft Lens kalibrasyon test alanı ekran görüntüsü

Çekilen resimler programa grafik ara yüz ile aktarılmaktadır. İşlem sonuçları piksel sayısı cinsinden verilmektedir. Ancak, çıktı olarak farklı yazılımlara metrik sistemde aktarılabilir. Test alanı için kullanılan karelerin boyutu 1. set için 50 piksel, 2. set içinse 100 piksel olarak seçilmiştir.

Set	Resim Çekme Mesafesi (cm)	Karenin Bir Kenarı (cm)	Satır x Sütun Sayısı
1. Set	35	0.9	10x19
2. Set	35	1.7	6x10

Tablo 4. Agisoft Lens yazılımı test alanı

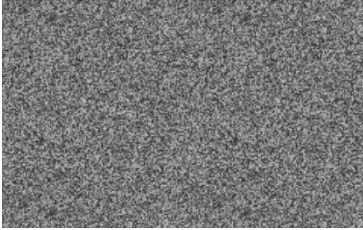
Yazılımın grafik ara yüzü Şekil 9'da görüldüğü gibidir. Ara yüzde resim dosyaları, kalibrasyon çıktıları ve distorsiyon grafikleri gösterilmektedir.



Şekil 9. Agisoft Lens grafik ara yüzü

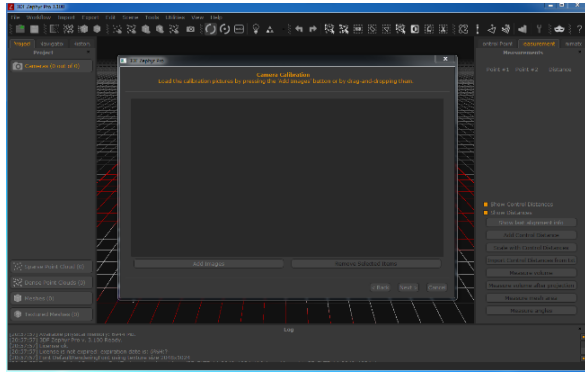
2.5 3D Flow Zephyr ile Kamera Kalibrasyonu

Fotogrametrik değerlendirme yazılımı olan 3DF Zephyr, kamera kalibrasyonu aracı da sunmaktadır. Program, diğerlerinden farklı olarak Prosedürel Perlin Gürültüsü (*Procedural Perlin Noise*) görüntüsünden yararlanmaktadır. Görüntü, kullanıcıdan herhangi bir girdi almaksızın bilgisayar ekranına yansıtılmaktadır. Test alanının insan gözüyle yorumlanması zor olup Şekil 10'da gösterildiği gibidir. Test alanındaki noktaların boyutu yaklaşık 2mm olarak ölçülmüş olup kaç nokta kullanıldığı bilinmemektedir.



Şekil 10. 3DF Zephyr kalibrasyon test alanı

Yazılımın grafik ara yüzü ise aşağıda gösterildiği gibidir. Kalibrasyon işlemi için tüm işlemler sıralı olarak tek pencere üzerinden devam ettirilmektedir.



Şekil 11. 3DF Zephyr grafik ara yüzü

3. SONUÇLAR VE YORUMLAR

Çalışma kapsamında dört ayrı yazılımla bir kamera kalibre edilmiştir. Yazılımların kendi içlerinde sunduğu seçenekler de kullanılarak hesaplanan parametrelere etkisi gözlemlenmiştir. Sonuçlarla ilgili yorumlar yapılırken, üreticiden alınabilen tek parametre olması sebebiyle, odak uzaklığı baz alınmıştır. Bunun haricinde distorsiyon parametreleri ve resim ana noktası konumu yoruma açık olarak paylaşılmıştır.

3.1 Sonuçlar

MATLAB: MATLAB ortamında yapılan kalibrasyon sonuçları aşağıdaki tabloda verildiği gibidir. Yazılımın piksel sayısı cinsinden verdiği sonuçlar, kamera üreticisinin verdiği piksel boyutu ile hesaplanarak milimetre cinsinden paylaşılmıştır.

MATLAB Kalibrasyon Çıktıları / İç Yöneltilme Elemanları						
Set	Odak Uzaklığı (c, mm)		Resim Ana Noktası Koordinatları (mm)			
	c	$v_c(\pm)$	x	$v_{x_0}(\pm)$	y	$v_{y_0}(\pm)$
1. Set	4.27	0.003	2.446	0.001	1.848	0.001
2. Set	4.23	0.001	2.440	0.000	1.837	0.001
3. Set	4.21	0.006	2.444	0.000	1.833	0.000
4. Set	4.16	0.001	2.442	0.000	1.804	0.001
5. Set	4.24	0.002	2.450	0.000	1.820	0.000

Tablo 5. MATLAB kalibrasyon sonuçları ve hata miktarları

Yapılan beş setin de kalibrasyon test alanı detayları Tablo 2'de verilmiştir. Yazılımın verdiği distorsiyon parametreleri ise Tablo 6'da verildiği gibidir.

MATLAB Kalibrasyon Çıktıları / Distorsiyon Parametreleri					
Set	Radyal			Teğetsel	
	K1	K2	K3	P1	P2
1. Set	0.0483	0.1650	-0.6435	0.0010	0.0015
2. Set	0.0651	0.0108	-0.2598	0.0007	0.0005
3. Set	0.0666	0.0014	-0.2418	0.0011	0.0008
4. Set	0.0678	-0.0176	-0.1895	0.0011	0.0010
5. Set	0.0697	-0.0452	-0.1511	-0.0006	0.0013

Tablo 6. MATLAB distorsiyon parametreleri

PMS: PMS ortamında yapılan kalibrasyon sonuçları yazılım tarafından milimetre cinsinde verilmektedir. Yazılımın ürettiği iç yöneltilme parametreleri Tablo 7'de verilmiştir.

PMS Kalibrasyon Çıktıları / İç Yöneltilme Elemanları						
Set	Odak Uzaklığı (c, mm)		Resim Ana Noktası Koordinatları (mm)			
	c	$v_c(\pm)$	x	$v_{x_0}(\pm)$	y	$v_{y_0}(\pm)$
Çoklu Kâğıt	4.39	0.002	2.568	0.002	1.909	0.001
Tek Kâğıt A4	4.42	0.003	2.519	0.002	1.944	0.002
Tek Kâğıt A0	4.38	0.001	2.557	0.000	1.909	0.000

Tablo 7. PMS kalibrasyon çıktıları

PMS sensör boyutlarını da hesaplamaktadır. Çoklu kâğıt, tek kâğıt A4 ve tek kâğıt A0 için hesaplanan sensör boyutları sırasıyla $(5.16 \times 3.86) \text{ mm}^2$, $(5.08 \times 3.86) \text{ mm}^2$, $(5.15 \times 3.86) \text{ mm}^2$ 'dir. Yazılımın hesapladığı distorsiyon parametreleri ise Tablo 8'de verildiği gibidir.

PMS Kalibrasyon Çıktıları / Distorsiyon Parametreleri					
Set	Radyal			Teğetsel	
	K1	K2	K3	P1	P2
Çoklu Kâğıt	-0.0042	0.0003	0.0000	-0.0002	-0.0001
Tek Kâğıt A4	-0.0036	0.0003	0.0000	0.0000	0.0000
Tek Kâğıt A0	-0.0040	0.0003	0.0000	-0.0002	-0.0001

Tablo 8. PMS ortamında hesaplanan distorsiyon parametreleri

Agisoft Lens: Programın piksel sayısı biriminde verdiği çıktılar, milimetre cinsinden tablo 9'da gösterilmiştir.

Agisoft Lens Kalibrasyon Çıktıları / İç Yöneltilme Elemanları						
Set	Odak Uzaklığı (c, mm)		Resim Ana Noktası Koordinatları (mm)			
	c	$v_c (\pm)$	x	$v_{x_0} (\pm)$	y	$v_{y_0} (\pm)$
1. Set	4.18	0.002	2.440	0.001	1.811	0.001
2. Set	4.25	0.005	2.468	0.001	1.828	0.002

Tablo 9. Agisoft Lens kalibrasyon çıktıları

Agisoft Lens yazılımının hesapladığı distorsiyon parametreleri ise Tablo 10'da verildiği gibidir.

Agisoft Lens Kalibrasyon Çıktıları / Distorsiyon Parametreleri					
Set No	Radyal			Teğetsel	
	K1	K2	K3	P1	P2
1. Set	0.0538	0.0498	-0.2915	0.0010	0.0013
2. Set	0.0634	-0.0211	-0.1813	0.0013	-0.0006

Tablo 10. Agisoft Lens distorsiyon parametreleri

Bu sonuçlara ek olarak, Agisoft Lens yazılımı her iki set için de sensör boyutunu (4.9533x3.715)mm² olarak hesaplamıştır.

3DF Zephyr: Yazılımın piksel sayısı cinsinden hesapladığı iç yöneltilme elemanları milimetre cinsinden Tablo 11'de verilmiştir.

3DF Zephyr Kalibrasyon Çıktıları / İç Yöneltilme Elemanları					
Odak Uzaklığı (c, mm)		Resim Ana Noktası Koordinatları (mm)			
c	$v_c (\pm)$	x	$v_{x_0} (\pm)$	y	$v_{y_0} (\pm)$
4.23	-	2.428	-	1.832	-

Tablo 11. 3DF Zephyr yazılımı kalibrasyon çıktıları

Program parametreler için ayrı ayrı hata hesabı sunmamaktadır. Yaptığı hesaplamalar için genel bir hata hesabı oluşturup sonuçlar arasında vermektedir. Bu hata hesabı, diğer yazılımların hata hesaplarıyla beraber aşağıda incelenmiştir.

3DF Zephyr dışındaki yazılımlar, hesaplanan odak uzaklığı ve resim ana noktası koordinatları için hata hesabı yapmaktadır. Agisoft Lens ise proje geneli için bir karesel ortalama hata (KOH) hesabı sunmamaktadır. Programların sunduğu proje geneli karesel ortalama hatalar Tablo 12'de paylaşıldığı gibidir.

Kalibrasyon	KOH ($\pm$ mm)
MATLAB 1. Set	4.6E-04
MATLAB 2. Set	5.2E-04
MATLAB 3. Set	6.4E-04
MATLAB 4. Set	6.7E-04
MATLAB 5. Set	4.0E-04
PMS Çoklu Kâğıt	4.0E-03
PMS Tek Kâğıt A4	6.2E-04
PMS Tek Kâğıt A0	3.1E-03
3DF Zephyr	9.5E-319

Tablo 12. Yazılımlar ve hesapladıkları KOH değerleri

3.2 Yorumlar

Yorumlamayı kolaylaştırmak açısından yazılımlar tarafından hesaplanan odak uzaklıkları Tablo 13'te bir arada gösterilmiştir.

Kalibrasyon	Odak Uzaklığı c (mm)	Üretici Verisinden Fark (mm)
MATLAB 1. Set	4.27	0.12
MATLAB 2. Set	4.23	0.08
MATLAB 3. Set	4.21	0.06
MATLAB 4. Set	4.16	0.01
MATLAB 5. Set	4.24	0.09
Agisoft 1. Set	4.18	0.03
Agisoft 2. Set	4.25	0.10
Çoklu Kâğıt	4.39	0.24
Tek Kâğıt A4	4.42	0.27
Tek Kâğıt A0	4.38	0.23
3DF Zephyr	4.23	0.08
Üretici Verisi 4.15mm		

Tablo 13. Programların hesapladığı odak uzaklıkları

Sonuçlar incelendiğinde dikkat çeken bir husus, oldukça benzer test alanlarıyla bile, iç yöneltilme elemanlarının farklı değerlerde hesaplanmış olmasıdır. Programların her denemede farklı sonuçlar vermesi ise değerlendirilmesi gereken ayrı bir durumdur.

Yazılımların hesapladıkları odak uzaklıkları baz alındığında, üretici verisine en yakın sonucun MATLAB yazılımı tarafından hesaplandığı görülmüştür. Ancak burada test alanındaki kontrol noktası sayısının sonuç üzerinde etkili olduğu gözlemlenmiştir. Zira aynı yazılım, farklı sayıdaki kontrol noktalarıyla 4.16mm ile 4.27mm arasında değişen odak uzaklığı değerleri hesaplamıştır. Test alanındaki nokta sayısı ile hesaplanan odak uzaklığı doğruluğu arasında ise bir doğru orantı olmadığı açıkça görülebilmektedir. Bu durum dikkate alındığında, yazılımın yüksek doğrulukla kamera kalibrasyonu yapabildiği, ancak bundan emin olabilmek için farklı boyutlarda dama tahtaları ile kalibrasyon yapılarak sonuçların teyit edilmesi gerektiği düşünülmektedir. Kalibrasyon test alanı için gerekli dama tahtası görüntüsü bu çalışmada bilgisayar ekranından görüntülenmiştir. Ayrıca, dama tahtasının fiziksel ölçüsünün bilindiği herhangi bir yüzeyin görüntüleri kalibrasyon için kullanılabilir. Her bir parametre ve kalibrasyonda kullanılan her bir resim için ayrı ayrı hata değerleri alınabilmektedir.

Agisoft Lens programının ise yine üretici verisine yakın sonuçlardan birini ürettiği gözlemlenmektedir. Kalibrasyon test alanı için kare boyutları değiştirilebilmekte, ancak, bilgisayar ekranından farklı yüzeyler kullanılamamaktadır. Kalibrasyon parametreleri farklı programların kullanılabileceği biçimlerde dışa aktarılabilir. Diğer yazılımların aksine, sözü edilen bu yazılım ücretsiz olarak sunulmaktadır.

3DF Zephyr yazılımıyla bilgisayar ekranına test alanı yansıtılarak kalibrasyon yapılmaktadır. Kullanım açısından değerlendirildiğinde Agisoft Lens ile benzer olduğu söylenebilir. Bilgisayar ekranından farklı bir yüzeyde test alanı oluşturulamamaktadır. Test alanı olarak kullanılan İşlemsel Perlin Gürültüsü görüntüsü insan gözüyle yorumlanamamakta olup kontrol noktası sayısı bilinmemektedir. Yazılım kalibrasyon parametrelerini xml formatında dışa aktarabilmektedir.

PMS yazılımı kendine has kodlu hedefleri olan test alanlarının kâğıt çıktılarıyla kalibrasyon yapmaktadır. Burada uygulamada dikkat edilmesi gereken husus kâğıtların herhangi dalgalanma olmadan sabitlenmesidir. Kâğıt üzerindeki kontrol noktaları iki boyutlu bir koordinat sisteminde tanımlanmaktadır. Dalgalanmanın sebep olduğu yükseklik farkları ise noktaların konumlarının olduğundan farklı algılanmasına yol açmaktadır.

Bu durum da sonuçları olumsuz etkilemektedir. Yazılım sensör boyutunu da hesaplayıp sonuçlar arasında paylaşmaktadır. Ancak, yapılan çok sayıda kalibrasyonun hemen hiçbirinde sensör boyutunun doğru olarak hesaplanmadığı gözlemlenmiştir. Bu durum daha önceki çalışmalarda da tespit edilmiştir (Özdemir, 2015). Sebebinin ise PMS programının hesaplamalara başlamadan önceki verileri resmin EXIF verilerinden (*Exchangeable Image File Format / Değişebilir Görüntü Dosyası Biçimi*) alması olarak düşünülmektedir. Bu veriler, sensöre ait teknik detaylardan toplam piksel sayısı ve sensör boyutlarını doğru olarak yansıtmadığında program yanılmaktadır. Bu veriler üzerinde düzeltme yapıldığında ise program o resmi işleme almamaktadır. Bahsedilen hatanın nasıl giderilebileceği bilinmemektedir. Sensör boyutu gibi fiziki olarak sabit olan bir parametrenin kesin değer olmayarak dengeleme hesabına dahil edildiği düşünülmektedir. PMS programının sunduğu distorsiyon parametrelerinin diğer yazılımlardan çok farklı olması da hesaplamalar için kullanılan tekniğe bağlanmaktadır.

Kullanılan tüm yazılımlar hata hesabı yapmakta olup bu hata hesaplarının ne kadar tutarlı olduğunun da üzerinde durulması gereken ayrı bir konu olduğu düşünülmektedir. Programların, yapılan hesaplamalar geneli için sunduğu karesel ortalama hatalar değerlendirildiğinde (Tablo.12) en yüksek karesel ortalama hatanın PMS programı tarafından, en düşük olanın ise 3DF Zephyr programı tarafından hesaplandığı görülmektedir. Burada hesaplanmış olan odak uzaklıkları ve resim ana noktası koordinatları göz önünde bulundurulduğunda sunulan karesel ortalama hata değerlerinin gerçekçi olmadığı kanısı oluşmuştur. Tüm programlar neredeyse milimetrenin binde biri mertebesinde karesel ortalama hata sunarken, sonuçların arasındaki farklar milimetrenin onda birleriyle ifade edilebilmektedir.

Elde edilen sonuçlar ve yapılan yorumlar birlikte değerlendirildiğinde kamera kalibrasyonu için kullanılan popüler denilebilecek yazılımların yüksek doğruluk ihtiyacı olan çalışmaları olumsuz etkileyebileceği kanısı oluşmaktadır.

Yüksek doğruluk beklentisini kullanım kolaylığı ile karşılayabilecek bir yazılım için ise kameraya ait teknik özelliklerin bir kısmının elle girilebilir şekilde tasarlanmasının faydalı olacağı düşünülmektedir. Yazılımların, bir kameranın en temel özelliklerinden biri olan, sensör ve piksel boyutu değerlerini hatalı hesaplayamayacak şekilde tasarlanması gerektiği fikrinin de bu çalışmayla ortaya konulduğu düşünülmektedir.

REFERANSLAR

- Duran, Z., Aydar, U., 2012. Digital modeling of world's first known length reference unit: The Nippur cubit rod. *Journal of Cultural Heritage* 13, 352-356.
- Heikkila, J., Silven, O., 1997. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction, *Computer Vision and Pattern Recognition, 1997. Proceedings.*, 1997 IEEE Computer Society Conference on. IEEE, pp. 1106-1112.
- Kraus, K., 2007. *Photogrammetry: Geometry from Images and Laser Scans*.
- Linder, W., 2009. *Digital Photogrammetry - A Practical Course*, 3 ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., Boehm, J., 2014. *Close-range photogrammetry and 3D imaging*. Walter de Gruyter.
- MathWorks, 2017a. *Object for Storing Camera Parameters*. The MathWorks, Inc.

MathWorks, 2017b. *Single Camera Calibration App*.

Nex, F., Remondino, F., 2014. UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied Geomatics* 6, 1-15.

Özdemir, E., 2015. *A Stereophotogrammetric Approach for Driver Assistance Systems*, Harita Mühendisliği Ana Bilim Dalı. İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi.

Sanz-Ablanedo, E., Chandler, J.H., Wackrow, R., 2012. Parameterising internal camera geometry with focusing distance. *The Photogrammetric Record* 27, 210-226.

Zhang, Z., 2000. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence* 22, 1330-1334.