FOTOGRAMETRİK BELGELEMEDE KULLANILAN SAYISAL VE TERMAL KAMERALARIN GEOMETRİK KALİBRASYONU

Naci YASTIKLI[1], Esra GÜLER[2], Abdullah BAL[3]

[1] Doç. Dr., Yıldız Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Davutpaşa Kampüsü, 34210,Esenler İstanbul, ynaci@yildiz.edu.tr
[2]Mim-Müh., Yıldız Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Davutpaşa, 34210,Esenler İstanbul, esragulerytu@gmail.com
[3] Doç. Dr., Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektronik Ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, Davutpaşa, 34210, Esenler İstanbul, bal@yildiz.edu.tr

ÖZET

Sayısal kameralar, artan çözünürlükleri ve sağladıkları otomasyon imkanları ile yersel fotogrametri ile belgeleme çalışmalarında oldukça popüler hale gelmiştir. Termal görüntüleme sistemleri, objeler tarafından yayınlanan sıcaklığı kızılötesi bölgede özellikle uzun kızılötesi bölgede (7-20 µm) kayıt yapan algılama sistemleridir. Bu algılama sistemleri tarihi binalarda nem, ıslak yüzeylerin yalıtım problemleri sebebi ile meydana gelen yapı yüzeyindeki deformasyonların analiz ve belgelemesi gibi sayısal kameralarla yapılması mümkün olmayan uygulamalarda kullanılmaktadır.

Bu araştırmanın amacı, tarihi ve kültürel miras özelliği taşıyan bina ve diğer objelerin yersel fotogrametri yöntemi ile 3 boyutlu olarak geometrik konumlarının belirlenmesi ve nem, ıslak yüzeylerin yalıtım problemleri sebebi ile meydana gelen cisim yüzeyindeki deformasyonların analiz ve belgelemesinde kullanılan sayısal ve termal kameraların geometrik kalibrasyonlarının gerçekleştirilmesidir. Bu amaçla, sayısal ve termal kamera geometrik kalibrasyonunu için 3 boyutlu test objesi tasarlanmıştır. 3 boyutlu test objesi üzerinde farklı derinlikteki kontrol noktalarının 3 boyutlu koordinatları totalstation ile ölçülmüştür. Geometrik kamera kalibrasyonu amacı ile, farklı derinlikte kontrol noktalarına sahip test objesinin sayısal fotoğrafları, Nikon D3X SLR sayısal kamera ve Flir A320 termal kamera ile çekilmiştir. Farklı noktalardan ve farklı dönüklülerle (90º sola, 90º sağa ve 180º) çekilen fotoğraflarda kontrol noktalarının fotoğraf koordinatları ölçülmüştür. Odak uzaklığı, iz düşüm merkezinin fotoğraf koordinat sistemindeki konumu ve distorsiyon hatalarından oluşan kamera kalibrason parametreleri ışın desteleri ile dengeleme işlemi ile dahil edilen ek parametrelerle belirlenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Sayısal Kamera, Termal Kamera, Geometrik Kalibrasyon, Işın Desteleri ile Dengeleme, Ek parametre

ABSTRACT

The digital cameras became very popular with their increased resolution and automation possibilities in documentation studies with close range photogrammetry. Thermal imaging systems are the sensor systems, records the temperatures emitted by the objects in infrared region especially in long infrared region (7-20 µm). These sensor systems have been used for deformation analyses and documentation application caused by moisture and isolation problem in wet areas which is not possible to conduct with digital cameras.

The aim of this research is to perform geometric calibration of the digital and termographic cameras which have been used for determination of 3D location, deformation analyses caused by moisture and isolation problem in wet areas and documentation in buildings which was recorded as historical and cultural heritage. For this purposes, 3D test object were designed for geometric calibration of digital and termographic camera. The coordinates of the control points on 3D test objects, which were distributed in different depth, were measured with total station. The digital photographs of the 3D test object were taken which has control points in different depth with Nikon D3X SLR digital camera and Flir A320 termographic camera. The photograph coordinate of the control points were measured in photos which were taken from different location and rotation (90º left, 90º right and 180º). The camera calibration parameters, contains the focal length, position of principal points and distortions were determined with additional parameters included in bundle block adjustment.

Keywords: Digital Camera, Termographic Cameras, Geometric Calibration, Bundle Block Adjustment, Additional Parameters

1. GİRİŞ

Sayısal kamera ve termal görüntüleme sistemleri modern tıp, otomotiv, endüstri, mimari ve askeri uygulamalarda geniş bir şekilde kullanılmaktadır (Dominic J. Mccafferty,2007). Bu görüntüleme sistemleri ve kameraların tarihi ve kültürel mirasın belgelenmesi, 3 boyutlu modellenmesi, deformasyon analizi, restorasyon ve koruma amaçlı kullanımı son yıllarda önemi ve kullanımı artan diğer uygulama alanlarıdır (Grinzato E., vd., 2002). Teknolojideki gelişmelere paralel olarak sayısal fotogrametri ile belgeleme çalışmalarında kullanılan kameraların çözünürlükleri artmış ve sağladıkları otomasyon imkanları ile fotogrametrik belgelemede oldukça popüler hale gelmiştir. Fotogrametrik belgeleme amaçlı çalışmalarda çoğunlukla sabit odak uzaklıklı (SLR) sayısal kameralar tercih edilmektedir.

Termal görüntüleme sistemleri, objeler tarafından yayınlanan sıcaklığı kızılötesi bölgede özellikle uzun kızılötesi bölgede (7-20 µm) kayıt yapan algılama sistemleridir. Bu algılama sistemleri tarihi binalarda nem, ıslak yüzeylerin yalıtım problemleri sebebi ile meydana gelen cisim yüzeyindeki deformasyonların analiz ve belgelemesi gibi sayısal kameralarla yapılması mümkün olmayan yeni uygulamalara olanak vermektedir (Rezzi et al,2007). Bugün, termal kameralar tarihi ve kültürel mirasın belgelenmesinde, nem, rutubet vb. çevresel etkenlerle tarihi dokuda oluşan deformasyonların belirlenmesi ve belgelenmesinde başarı ile kullanılmaktadır (Ghedini, vd., 2003). Bu çalışmalarda söz konusu objeye ilişkin belirlenen 3 boyutlu koordinatların doğruluğu, kullanılan sayısal ve termal kameraların geometrik performansına bağlıdır. Geometrik kamera kalibrasyon işlemi ile, sayısal kamera ve termal kameraların kalibrasyon parametreleri, diğer bir değişle odak uzaklığı ve distorsiyon hataları belirlenmektedir. Kalibrasyon işlemi genellikle, laboratuvar ortamında özel olarak hazırlanmış test objelerinin fotoğrafları kullanılarak gerçekleştirilir. Sayısal ve termal kameralar ile elde edilen görüntüler kullanılarak fotogrametrik belgeleme ve deformasyon analizi çalışmalarının sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi için geometrik kamera kalibrasyonunun yapılması gereklidir.

Bu çalışmanın amacı, tarihi ve kültürel mirasın belgelenmesi, 3 boyutlu modelleme çalışmalarında kullanılan SLR sayısal kamera ve termal görüntüleme sistemlerinin geometrik kalibrasyonunun gerçekleştirilmesi ve bu kameraların bu tür çalışmalardaki kullanım performansının test edilmesidir. Bu amaçla, öncelikle geometrik kalibrasyon işleminin gerçekleştirilmesi için 3 boyutlu test objesi tasarlanmıştır. Tasarlanan 3 boyutlu test objesi imalatının gerçekleştirilmesinden sonra farklı noktalardan çekilen çok sayıdaki fotoğraflarla geometrik kalibrasyon işlemi ışın desteleri ile dengelemeye dahil edilen ek parametreler yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Bundan sonraki bölümde geometrik kamera kalibrasyonu için izlenecek yöntemin detayları ayrıntılı bir biçimde açıklanmıştır. Uygulama bölümünde detayları açıklanan yaklaşım izlenerek gerçekleştirilen geometrik kalibrasyon işlemi sonrasında elde edilen sonuçların değerlendirme ve analizi sonuç ve öneriler kısmında yapılmıştır.

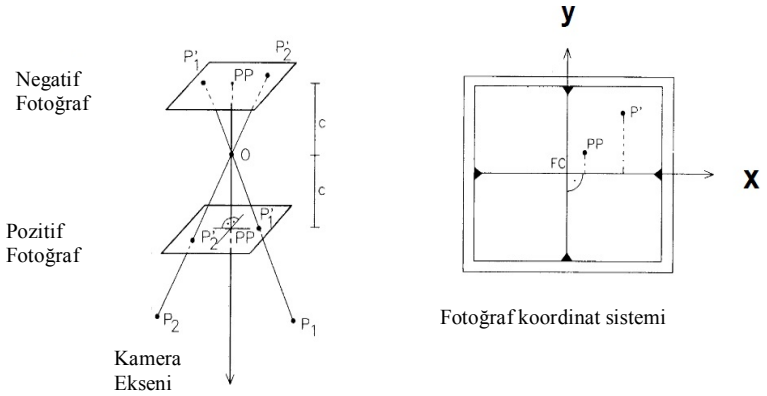
2. YÖNTEM

Fotogrametri, cismin şekli, boyutları ya da konumunun bir algılama sistemi ile kaydedilen fotoğraf ya da fotoğraf topluluğunu kullanarak belirlemeyi amaç edinir. Bu amacı yerine getirmek için bir dizi ölçüm ve yöneltme işlemleri gerçekleştirilir. Bu amaçla kullanılan algılama sistemi ya da kameranın geometrisinin bilinmesine ihtiyaç duyulur (Fraser 1997, Cramer, 2003, Luhmann vd., 2010, Lagüela vd., 2011, Karslı ve Ayhan, 2005, Yıldız vd., 2005, Taşdemir vd., 2009). Bu durum klasik fotogrametrik yaklaşımda kameranın odak uzaklığı ve izdüşüm merkezinin konumunun yani iç yöneltme elemanlarının belirlenmesi olarak ifade edilir. Algılama sistemi ya da fotoğraf makinesinin mercek distorsiyonunun belirlenmesi de belirlenen konum, şekil, boyut ya da koordinat doğruluğu için son derece önemlidir.
Fotoğraflardan, yani iki boyutlu görüntülerden, üç boyutlu bilgi elde edebilmek için bazı koşulların yerine getirilmesi gerekir. Üç boyutlu ölçüm ve değerlendirme yapabilmek için kullanılan farklı yöntemlerde çoğunda iç yöneltme elemanları ve distorsiyon hatalarından oluşan kamera kalibrasyon parametreleri bilinmesi ve söz konusu objenin az iki farklı noktadan görüntüsünün kaydedilmesi gereklidir (Remondino, Fraser, 2006).

2.1. İç Yöneltme Elemanları

Fotogrametrik yöntemle cismin şekli, boyutları ya da konumunun belirlenmesi, bilinen iç yöneltme elemanları ve cisme ait ölçülen fotoğraf koordinatları yardımıyla yöneltme aşamaları sonucunda elde edilen dış yöneltme elemanları kullanılarak gerçekleştirilir.

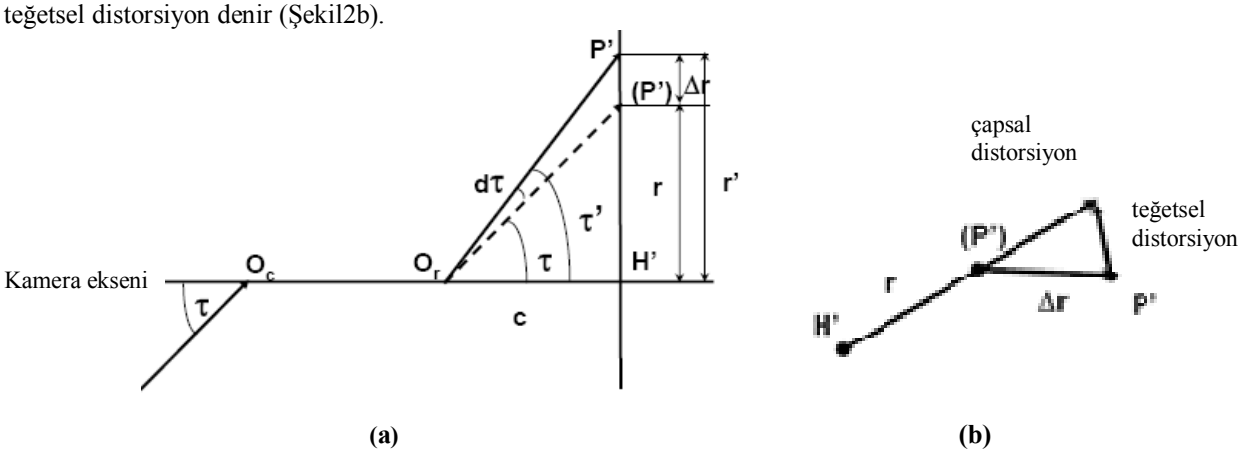
Fotogrametrik kameraların asal uzaklığı (c) ile asal noktanın konumuna (x_0, y_0) iç yöneltme elemanları denir. Bu üç eleman yardımı ile fotoğraf noktasından geçen izdüşüm ışını doğru olarak konumlandırılabilir. Analog fotogrametrik kameralarda asal noktanın konumu çerçeve işaretlerinin oluşturduğu bir koordinat sistemine göre tanımlanır (Şekil1). Asal uzaklık, net görüntünün oluştuğu fotoğraf düzleminin izdüşüm düzlemine olan uzaklığıdır. Asal noktanın konumu, fotoğraf çerçeve işaretlerinin belirlediği fotoğraf koordinat sistemine göre tanımlanır. Fotogrametrik bir kamera ile çekilen bir fotoğraf ile ölçü yapılabilmesi için izdüşüm parametrelerinin yani iç yöneltme elemanlarının bilinmesi gerekir.



Şekil 1. İç yöneltme elemanları ve fotoğraf koordinat sistemi

2.2. Distorsiyon Hataları

Kameralarda kullanılan mercek sistemleri tek bir mercek yerine çok sayıda merceğin bir araya gelmesinden oluşmaktadır ve mercek sistemindeki hatalar nedeni ile obje üzerindeki bir P noktasının fotoğraf üzerindeki izdüşümü olması gereken yerden farklı bir yerde oluşmaktadır. Bu P noktasından gelen ışın, kamera ekseni ile τ açısı yaparken kamera objektif sistemindeki kusurlardan dolayı fotoğraf uzayında τ' açısı yaparak çıkacaktır. Sonuç olarak P noktasının görüntüsü P noktası yerine olması gerekenden Δr kadar farklı bir konumda P' noktasında oluşacaktır. Bu farka kamera distorsiyon hatası denir. Kamera kalibrasyonu ile distorsiyonun fotoğraf üzerinde yapılan ölçülere etkisi belirlenir. Kamera kalibrasyonu ile belirlenen distorsiyon değerleri kullanılarak fotoğraf koordinatları düzeltilir. (P') ve P' noktasını birleştiren Δr doğru parçası vektörel hatadır (Şekil2a). Bu çap ve teğet yönünde iki bileşene ayrılabilir. Çap yönünde (r yönünde) olan bileşenine çapsal (radyal) distorsiyon, diğerine de teğetsel distorsiyon denir (Şekil2b).



Şekil 2. Disorsiyon hatası (a), çapsal ve teğetsel distorsiyon (b)

Distorsiyonsuz izdüşüm;

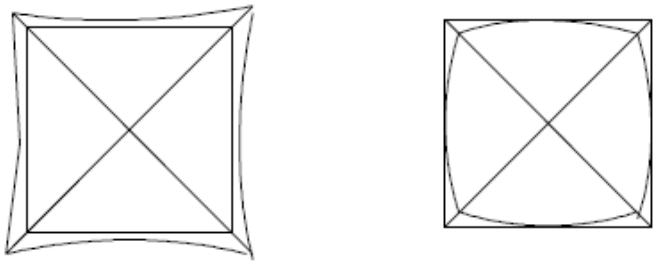
$$r = c.\ tan\ \tau \tag{1}$$

fonksiyonu ile elde edilir ve buna görüntü fonksiyonu denilir. Teorik ve teknik nedenlerden dolayı distorsiyonsuz objektiflerin yapımı olanak dışıdır ancak distorsiyon değeri belirli bir değerin altında tutulabilir. Bu nedenle gerçek fiziksel izdüşümün görüntü fonksiyonu f(τ) ile teorik görüntü fonksiyonu r = c.tanτ arasındaki fark distorsiyon nedeni ile doğan Δr sapmasıdır. Bu sapma;

$$\Delta r = r' - r = r' - c.tan\ \tau = f(\tau) - c.tan\ \tau \tag{2}$$

dir. Fotogrametrik kameralarda distorsiyon hatasının minimum olması için kameralar üretilirken gerekli önlemler alınır. Fakat yine de yukarıda açıklanan etkilerin ortaya çıkmasını sağlayan hatalar oluşur. Metrik kameralarda, laboratuvar ortamında yapılan duyarlı ölçmeler sonunda kameranın belirli koşullara göre distorsiyonu hesaplanır. Bu durum bir raporla kullanıcılara verilir.

Distorsiyon hatası nedeniyle nesnelerin fotoğraf üzerindeki izdüşümünü etkilediği için fotoğraf koordinatlarının değiştirmesine sonuç olarak da fotoğraf düzleminde ölçek değişimine sebep olur. Bu değişim iki şekilde gerçekleşir. İlkinde ölçek izdüşüm düzleminin kenarlarına doğru artar. Bu durumda pozitif bir distorsiyondan söz edilir ve bir kare biçimindeki cismin izdüşümü yastık biçiminde olur. Eğer izdüşüm ölçeği kenara doğru azalacak olursa, distorsiyon negatif olur aynı kare biçimindeki cismin izdüşümü fıçı şekline dönüşür (Şekil 3).



(a) (b)

Şekil 3. Pozitif (a) ve negatif (b) distorsiyon

2.3. Geometrik Kalibrasyon

Fotogrametrik olarak konum belirleme ve kalibrasyon metotlarında yaygın olarak kullanılan yöntem ışın desteleri ile dengelemeye ek parametreler dahil edilmesidir. Ek parametrelerle yapılan ışın desteleri le dengeleme sonucunda, birden fazla fotoğraflar üzerinde ölçülen noktaların referans koordinat sistemindeki koordinatları ile kamera kalibrasyon parametreleri elde edilir. Işın desteleri ile dengeleme yönteminin matematik temeli merkezsel izdüşüm denklemleri diğer bir deyişle kolinarite eşitliklerine dayanır;

$$x - x_0 = -c\frac{m_{11}(X - X_0) + m_{21}(Y - Y_0) + m_{31}(Z - Z_0)}{m_{13}(X - X_0) + m_{23}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} + \Delta x = -c\frac{U}{W} + \Delta x$$

$$y - y_0 = -c\frac{m_{12}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{32}(Z - Z_0)}{m_{13}(X - X_0) + m_{23}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} + \Delta y = -c\frac{U}{W} + \Delta y \quad (3)$$

Burada;

x, y: fotoğraf koordinatları,
x_0, y_0: asal noktanın (PP) fotoğraf koordinatları,
c: kamera odak uzaklığı,
X, Y, Z: referans koordinat sistemindeki koordinatlar,
X_0, Y_0, Z_0: izdüşüm merkezinin referans koordinat sistemindeki koordinatları,
m_{ij}: fotoğraf koordinat sistemi ile referans koordinat sistemi arasındaki dönüklük matrisi (M) elemanları
Δx ve Δy: ek parametreler

Kolinarite eşitlikleri, bazı sistematik hataları içerecek şekilde genişletilir. Bu sistematik hataların düzeltilmesi için ışın desteleri ile dengelemeye dahil edilen ek parametreler kullanılır. Ek parametrelerin en yaygın dizisi, CCD kameralardaki sistematik hataları gidermek için kullanılan, 1971de Brown tarafından formüle edilen fiziksel modeldir (Brown, 1971). Fotogrametride yaygın olarak kullanılan ek parametre seti;

- iç yöneltme parametreleri (Δx_0, Δy_0, Δc),
- ölçek faktörü (*B1*),
- fotoğraf koordinat eksenlerinin dik olmaması (*B2*),
- çapsal distorsiyon (radyal) parametreleri (*K1, K2, K3*)
- teğetsel distorsiyon parametreleri (*P1, P2*) den oluşur.

Formül 3 deki Δx ve Δy (McGlone, 2004);

$$\Delta x = -x_0 - \frac{x}{c}\Delta c - \bar{x}A + \bar{y}B + \bar{x}r^2K_1 + \bar{x}r^4K_2 + \bar{x}r^6K_3 + (2\bar{x}^2 + r^2)P_1 + 2P_2\overline{xy} \quad (4)$$

$$\Delta y = -y_0 - \frac{\bar{y}}{c}\Delta c - \bar{x}B + \bar{y}r^2K_1 + \bar{y}r^4K_2 + \bar{y}r^6K_3 + 2P_1\overline{xy} + (2\bar{y}^2 + r^2)P_2$$

dir. Formül 4'deki $\bar{x}$ ve $\bar{y}$ ötelenmiş fotoğraf koordinatları ve *r* ise çapsal uzaklığı;

$$\bar{x} = x - x_0; \bar{y} = y - y_0; r = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2} \quad (5)$$

ifade etmektedir. Radyal distorsiyon Δr ise;

$$\Delta r = K_1 r^3 + K_2 r^5 + K_3 r^7 \quad (6)$$

şeklinde ifade edilir. Burada K_i radyal distorsiyon katsayılarını göstermektedir. Formül 4'deki P_1 ve P_2 ise teğetsel distorsiyon parametrelerini ifade etmektedir.

Işın desteleri ile dengelemede kolinarite eşitliklerini (Formül 3) esas alan matematiksel model yardımıyla ek parametreler, fotoğraf çekim noktalarının konum ve dönüklükleri (dış yöneltme elemanları) ve obje koordinatları belirlenir. Fotoğraf üzerinde ölçülen her bir noktanın fotoğraf koordinatları için kolinarite eşitliği yazılır. Işın desteleri ile dengeleme sırasında bindirmeli olarak çekilmiş fotoğraf bloğunda ölçülen bütün noktalar için kolinarite eşitlikleri bir bütün olarak ele alınır ve bilinmeyenler kestirilir. Kolinarite eşitlikleri bilinmeyenlere göre doğrusal değildir. Bilinmeyenlerin çözümü için doğrusallaştırma işlemi için 1. derece Taylor serisi kullanılır ve sistemin çözümü en küçük kareler ilkesine (Gauss-Markov modeli) göre yapılır. Bu yaklaşımda bilinmeyenlerin yaklaşık değerlerine ihtiyaç vardır. Yaklaşık değerler genelde bilinmediği için çözüm iteratif olarak gerçekleştirilir. İterasyon işlemini sonlandırmak için farklı fotoğraflarda ölçülen aynı noktaların hesaplanan koordinat değerleri arasındaki farklar ve/veya iterasyon sonunda kestirilen dış yöneltme elemanları ile bir önceki iterasyon sonrasında hesaplanan dış yöneltme elemanları arasındaki farklar kontrol edilir.

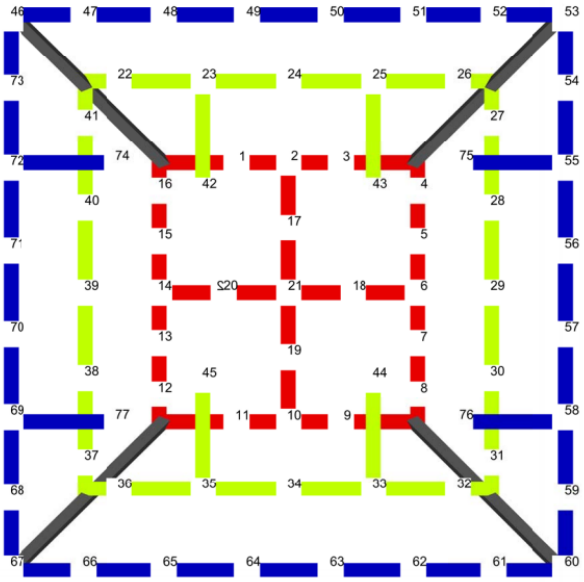
Kolinarite eşitliklerinin çözümü için hem fotoğraf koordinatları hem de referans koordinat sistemindeki koordinatları bilinen kontrol noktalarına ihtiyaç vardır. Ek parametreler yardımıyla iç yöneltme elemanlarının özellikle kamera asal uzaklığının sağlıklı bir şekilde kestirilmesi için kontrol noktalarının farklı derinlik seviyelerinde bulunması gerekir. Fotogrametrik belgeleme amaçlı kullanılan sayısal ve termal kameraların geometrik kalibrasyonunun sağlıklı bir biçimde yapılabilmesi için, 3 boyutlu test objesinin iyi bir şekilde tasarlanması gerekir. 3 boyutlu test objesindeki kontrol noktalarının uygun dağılmış olmaları, farklı derinlik seviyesinde olmaları ve farklı açılardan çekilen fotoğraflarda kontrol noktalarının birbirini kapatmaması gerekmektedir. 3 boyutlu test objesindeki kontrol noktalarının koordinatları hassas bir şekilde belirlenmelidir.

3. UYGULAMA

Bu bölümde, fotogrametrik belgeleme amaçlı kullanılan sayısal ve termal kameraların geometrik kalibrasyonu için tasarlanan 3 boyutlu test objesi hakkında ayrıntılı bilgiler verilmiştir. Çalışmada kullanılan sayısal kamera ve termal kamera hakkındaki bilgiler ve geometrik kalibrasyon işlemi sırasında izlenilen yaklaşım özetlenmiştir. Sayısal ve termal kameraların geometrik kalibrasyon işlemi sonucunda elde edilen kalibrasyon parametreleri ve standart sapmaları verilmiştir.

3.1. Üç Boyutlu Test Objesi

Bu çalışmada geometrik kamera kalibrasyon parametrelerinin bulunması için 77 kontrol noktasından oluşan 3 boyutlu bir test objesi tasarlanmıştır. Bu tasarımın gerçekleştirilmesinde sayısal hava kameralarının laboratuvar kalibrasyonlarında kullanılan test objeleri incelenmiş ve kontrol noktalarının yerleri farklı fotoğraf çekim noktalarından fotoğraf çekildiğinde birbirini örtmeyecek şekilde düzenlenmiştir. Geometrik kalibrasyon işlemi sırasında kamera asal uzaklığının sağlıklı bir şekilde kestirilmesi için, kontrol noktaları üç farklı derinlik seviyesindedir. Tasarlanan 3 boyutlu test objesi Auotocad programında 3 boyutlu modellenmiştir. Şekil 4'te mavi, yeşil ve kırmızı ile gösterilen farklı derinlik seviyeleri arasındaki mesafe yaklaşık 70 cm dir. Tasarlanan test objesinin imalatı demir profilden yapılmış kontrol noktalarına hazırlanan özel işaretler yapıştırılmıştır. Özel işaretlerin orta noktalarının koordinatları reflektörsüz totalstation ile ölçülmüştür.



Şekil 4. 3 boyutlu test objesi

3.2. Kameralar

Fotogrametrik belgeleme amaçlı kullanılan sayısal kamera ve termal kameraların geometrik kalibrasyonu için Nikon D3X SLR fotoğraf makinesi ve Flir A320 Termal kamera kullanılmıştır (Şekil 5). Flir A320 termal kamera, 7.5-13 µm spectral aralığa sahiptir. Bu çalışmada kullanılan kameraların teknik özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

(a) (b)

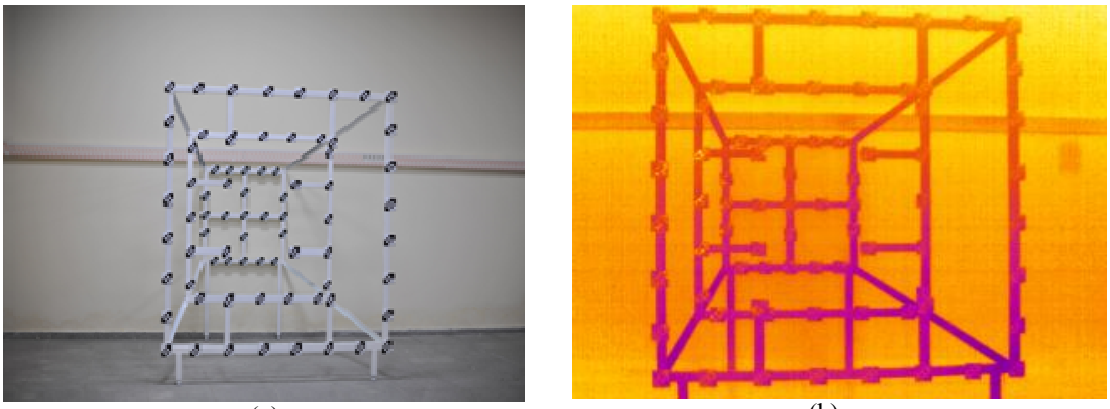
Şekil 5. Sayısal Kamera (Nikon D3X SLR) (a), Termal Kamera (Flir A320) (b)

Çizelge 1. Sayısal kamera ve termal kamera teknik özellikleri.

Özellikler	**Sayısal Kamera**	**Termal Kamera**
Kamera Modeli	Nikon D3X	Flir A320
Piksel Sayısı	6048 x 4032	320x240
Piksel Boyutu	6 µm	25µm
Odak Uzaklığı	20mm	18mm
Termal Çözünürlük	-	±2 C°

3.3. Sayısal ve Termal Kameraların Geometrik Kalibrasyonu

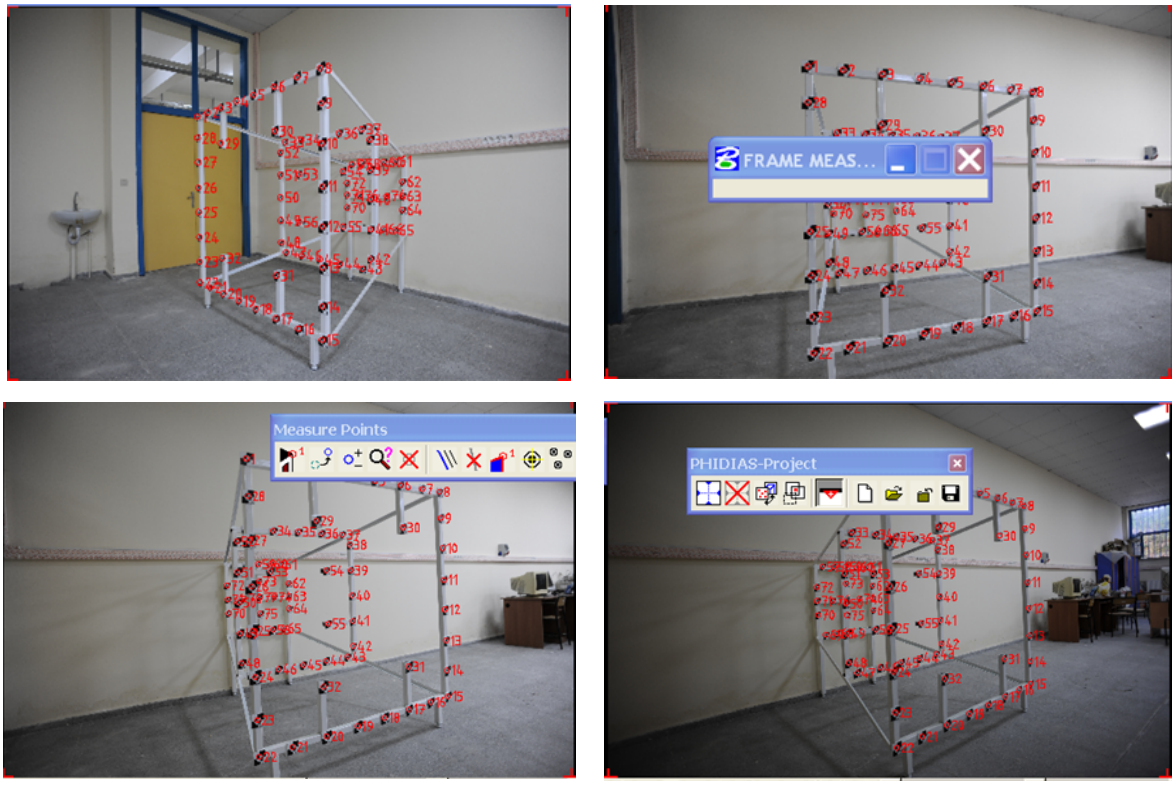
Geometrik kalibrasyon amacı ile tasarlanan ve imalatı yapılan 3 boyutlu test objesinin fotoğrafları farklı noktalardan ve kameranın normal konumu dışında farklı dönüklülerle (90º sola, 90º sağa ve 180º) Nikon D3X SLR fotoğraf makinesi ve Flir A320 termal kamera ile çekilmiştir (Şekil 6).



(a) (b)

Şekil 6. Nikon D3X SLR fotoğraf makinesi (a) ve Flir A320 termal kamera (b) ile çekilen fotoğraflar

Işın desteleri ile dengeleme işlemine yaklaşık değer olarak kamera asal noktalarının konumları fotoğraf orta noktaları ile çakışık kabul edilmiş ve fotoğraf koordinat sistemi tanımlanmıştır. Daha sonra sayısal kamera ve termal kamera için ayrı ayrı tanımlanan bu koordinat sistemleri yardımıyla 3 boyutlu test objesindeki kontrol noktalarının fotoğraf koordinatları sayısal ve termal kamera ile kaydedilen görüntüler üzerinde ölçülmüştür. Fotoğraf koordinatlarının ölçümü ve ışın desteleri ile dengeleme işlemleri için PHOCAD firması tarafından geliştirilen PHIDIAS yazılımı kullanılmıştır. Şekil 7'de 3 boyutlu test objesindeki kontrol noktalarının Nikon D3X SLR fotoğraf makinesi ile farklı noktalardan çekilen fotoğraflar üzerindeki koordinat ölçümleri görülmektedir. Ölçülen 3 boyutlu test objesindeki kontrol noktalarının referans koordinatları ışın desteleri ile dengeleme yazılımında sayısal kamera ve termal kamera için ayrı ayrı açılan proje dosyalarına girilmiştir. Fotoğraf bloğundaki tüm fotoğraflar kullanılarak, 3 boyutlu test objesindeki kontrol noktalarının fotoğraf koordinatları ve referans koordinat sistemindeki koordinatları, Çizelge 1'de verilen kamera odak uzakları ve fotoğraf orta noktası ile çakışık olarak kabul edilen asal noktanın fotoğraf koordinatları ile iç yöneltme, karşılıklı yöneltme ve mutlak yöneltme işlemleri yapılmıştır.



Şekil 7. 3 boyutlu test objesindeki kontrol noktalarının fotoğraf koordinatlarının Nikon D3X SLR fotoğraf makinesi çekilen fotoğraflar üzerindeki ölçümleri

Işın desteleri ile dengeleme işlemi öncelikle kaba hata ayıklama seçeneği aktif edilerek kaba hatalı ölçümler düzeltilmiştir. Işın desteleri ile dengeleme işlemi kaba hataları düzeltilmiş ölçülerle yapılmıştır. Işın desteleri ile dengeleme işlemi sonrasında sayısal kamera ve termal kamera ile çekilen fotoğraflara ilişkin dış yöneltme elemanları belirlenmiştir. İkinci aşamada belirlenen bu dış yöneltme elemanları kullanılarak ışın desteleri ile dengelemeye iç yöneltme parametreleri (Δx_0, Δy_0, Δc), çapsal distorsiyon (radyal) parametreleri (K1, K2, K3) ve teğetsel distorsiyon parametreleri (P1, P2) için ek parametreler dahil edilmiştir. Işın desteleri ile dahil edilen ek parametreler yardımıyla Nikon D3X SLR Sayısal kamera için kestirilen geometrik kalibrasyon parametreleri Çizelge 2'de standart sapmaları ile birlikte verilmiştir.

Çizelge 2. Nikon D3X SLR Sayısal kamera geometrik kalibrasyon parametreleri

Ek parametre	Parametre	Standart Sapma
Kamera odak uzaklığı, c (mm)	19.7582	0.0293
Asal noktanın konumu x_0 (mm)	-0.0293	0.0102
Asal noktanın konumu y_0 (mm)	-0.0955	0.0104
Çapsal distorsiyon K_1	$-2.8036 * 10^{-4}$	0.0267
Çapsal distorsiyon K_2	$5.6921 * 10^{-7}$	0.2301
Çapsal distorsiyon K_3	$-2.7187 * 10^{-10}$	0.5545
Teğetsel distorsiyon P_1	$-4.3235 * 10^{-5}$	0.6193
Teğetsel distorsiyon P_2	$-7.2408 * 10^{-5}$	0.6136

Flir A320 termal kamera için kestirilen geometrik kalibrasyon parametreleri ise Çizelge 3'de standart sapmaları ile birlikte verilmiştir.

Çizelge 3. Flir A320 termal kamera geometrik kalibrasyon parametreleri

Ek parametre	Parametre	Standart Sapma
Kamera odak uzaklığı, c (mm)	17.2262	0.1288
Asal noktanın konumu x_0 (mm)	0.2883	0.0512
Asal noktanın konumu y_0 (mm)	-0.1995	0.0656
Çapsal distorsiyon K_1	$-30.6381 * 10^{-4}$	4.6329
Çapsal distorsiyon K_2	$2599.4545* 10^{-7}$	493.9109
Çapsal distorsiyon K_3	$-98791.5437* 10^{-10}$	16416.9520
Teğetsel distorsiyon P_1	$-22.6353* 10^{-5}$	4.6768
Teğetsel distorsiyon P_2	$28.1114* 10^{-5}$	4.8051

Nikon D3X SLR Sayısal kamera için ışın desteleri ile dengeleme sonucunda odak uzaklığı 19.7582 mm olarak 0.0293 mm standart sapma ile belirlenmiştir. Nikon D3X SLR Sayısal kamera için ışın desteleri ile dengelemeye 0, 0 girilen asal noktanın konumu (x_0, y_0) -0.0293 mm, -0.0955 mm olarak 0.0102 mm ve 0.0104 mm standart sapmalarla belirlenmiştir. Flir A320 termal kamera için odak uzaklığı 17.2262 mm olarak 0.1288 mm standart sapma ile belirlenmiştir. Flir A320 termal kamera için ışın desteleri ile dengelemeye 0, 0 girilen asal noktanın konumu (x_0, y_0) 0.2883 mm, -0.1995 mm olarak 0.0512 mm ve 0.0656 mm standart sapmalarla belirlenmiştir. Formül 4' de verilen çapsal ve teğetsel distorsiyon parametreleri Çizelge 2 ve Çizelge 3'te verilmiştir. Bu değerler incelendiğinde Flir A320 termal kamera için hesaplanan distorsiyon parametrelerinin Nikon D3X SLR Sayısal kameraya göre büyük olduğu görülebilir. Bu sonuçlar esas alındığında, termal kamera mercek kalitesi sayısal

kamera mercek kalitesine göre daha düşüktür. Benzer durum bu parametreler için hesaplanan standart sapmalar için de geçerlidir. Her iki kameranın geometrik performansları karşılaştırılırken kameraların çözünürlükleri de göz önünde bulundurulmalıdır. Sayısal kameradaki 1 pikselin büyüklüğü 6 µm iken termal kamerada 25 µm dur (Çizelge 1).

Işın desteleri ile dengelemeye dahil edilen ek parametreler ile iç yöneltme elemanları ve çapsal ve teğetsel distorsiyon parametreleri kestirilmiş ve fotoğraflar üzerinde yapılan koordinat ölçümlerine ilişkin dengeleme sonucunda hesaplanan standart sapmalar Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 4. Işın desteleri ile dengeleme sonucunda kestirilen fotoğraf koordinatlarına ilişkin standart sapmalar

Kamera	**σ_x (mm)**	**σ_y (mm)**
Nikon D3X SLR Sayısal kamera	0.00830	0.00770
Flir A320 termal kamera	0.00963	0.01054

4. SONUÇ VE ÖNERILER

Bu çalışmada, tarihi ve kültürel miras özelliği taşıyan bina ve diğer objelerin 3 boyutlu olarak geometrik konumlarının belirlenmesi ve nem, ıslak yüzeylerin yalıtım problemleri sebebi ile meydana gelen cisim yüzeyindeki deformasyonların analiz ve belgelemesinde kullanılan sayısal ve termal kameraların geometrik kalibrasyonları gerçekleştirilmiştir. Geometrik kalibrasyon işleminin gerçekleştirilmesi için 3 boyutlu test objesi tasarlanmıştır. Tasarlanan 3 boyutlu test objesi imalatının gerçekleştirilmesinden sonra farklı noktalardan çekilen çok sayıdaki fotoğraflarla Nikon D3X SLR fotoğraf makinesi ve Flir A320 termal kameranın geometrik kalibrasyon işlemi ışın desteleri ile dengelemeye dahil edilen ek parametreler yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Işın desteleri ile dengelemeye dahil edilen ek parametreler yardımıyla Nikon D3X SLR sayısal kamera ve Flir A320 termal kamera için iç yöneltme parametreleri (x_0, y_0, c), çapsal distorsiyon (radyal) parametreleri (K1, K2, K3) ve teğetsel distorsiyon parametreleri (P1, P2) ve standart sapmaları kestirilmiştir.

Her iki kamera için kestirilen parametreler ve standart sapmaları incelendiğinde Flir A320 termal kameranın geometrik performansının Nikon D3X SLR sayısal kameraya göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Nikon D3X SLR sayısal kameranın odak uzaklığı ışın desteleri ile dengeleme sonucunda 19.7582 mm olarak 29.3 µm standart sapma ile belirlenmiştir. Benzer şekilde asal noktanın konumu (x_0, y_0) -0.0293 mm, -0.0955 mm olarak 10.2 µm ve 10.2 µm standart sapmalarla belirlenmiştir. Ek parametreler dahil edilerek kestirilen iç yöneltme elemanları ve çapsal ve teğetsel distorsiyon parametreleri dikkate alındığında Nikon D3X SLR sayısal kamerada fotoğraf koordinatlarına ilişkin standart sapma *x*'de 8.3 µm ve *y*'de 7.7 µm olarak belirlenmiştir. Flir A320 termal kamerada fotoğraf koordinatlarına ilişkin standart sapma ise *x*'de 9.6 µm ve *y*'de 10.5 µm olarak belirlenmiştir. Bu durum, her ne kadar Flir A320 termal kameranın geometrik performansının Nikon D3X SLR sayısal kameraya göre düşük olsa da, geometrik kalibrasyon parametrelerinin tasarlanan 3 boyutlu test objesi yardımıyla başarıyla modellendiğini ve modellenen parametrelerle her iki kamera için fotoğraf üzerinde yapılan ölçümler için yakın doğruluklar elde edildiğini göstermektedir.

Tarihi ve kültürel mirasın belgelenmesi, 3 boyutlu modelleme çalışmalarında kullanılan sayısal kameralar ve nem, rutubet vb. çevresel etkenlerle tarihi dokuda oluşan deformasyonların belirlenmesi ve belgelenmesinde kullanılan termal kameralar ile söz konusu objeye ilişkin belirlenen 3 boyutlu koordinatların doğruluğu, kullanılan sayısal ve termal kameraların geometrik performansına bağlıdır. Farklı projelerde, yersel fotogrametri yöntemi ile objeye ilişkin 3 boyutlu koordinatların doğru ve hassas bir biçimde belirlenmesi için iç yöneltme parametreleri (x_0, y_0, c), çapsal distorsiyon (radyal) parametreleri (K1, K2, K3) ve teğetsel distorsiyon parametrelerinden (P1, P2) oluşan geometrik kalibrasyon parametrelerinin belirlenmesi gerekir. Bu işlem için farklı derinliklerde uygun dağılmış kontrol noktalarına sahip 3 boyutlu test objeleri kullanılmalı ve bu parametreler uygun bir yazılımla ışın desteleri ile blok dengelemesine dahil edilen ek parametrelerle belirlenmelidir. Özellikle kamera odak uzaklığının belirlenmesi için 2 boyutlu düzlem hedefler yerine farklı derinliklerde uygun dağılmış 3 boyutlu test objeleri kullanılmalıdır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 2010-05-03-KAP01 Proje No ve "Tarihi Yapıların Fotogrametrik Belgeleme ve Deformasyon Analizinde Sayısal ve Termal Kameraların Kullanımı" isimli Kapsamlı Araştırma Projesi çerçevesinde gerçekleştirilen araştırma sonuçlarının bir bölümünü içermektedir. Mali desteklerinden dolayı Yıldız Teknik Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Brown, D.C., *1971, "Close-range camera calibration, Photogrammetric Engineering", 37(8):855–866.*
Cramer, M., *2003, "EuroSDR Project Digital Camera Calibration ", Presentation of Project Proposal, 103rd EuroSDR Science and Steering Committee Meetings, München, Germany*

Fraser, C.S., *1997, " Digital camera self-calibration, ISPRS International Journal of Photogrammetry and Remote Sensing", 52:149–159.*

Ghedini, N., Sabbioni, C., Pantani, M., *2003, "Thermal Analysis in Cultural Heritage Safeguard: An Application". Thermochimica Acta Volume 406, Issues 1–2, 28 November 2003, Pages 105–113*

Grinzato, E., Bison, P.G., Marinetti, S., *2002, "Monitoring of Ancient Buildings by The Thermal Method ", CNR-ITEF Corso Stati Uniti, 4 – 35127 Padova, Italy, Journal of Cultural Heritage 3 (2002) 21–29.*

Karslı, F., Ayhan, E., *2005, "Orta Ve Yüksek Çözünürlüklü Dijital Kameraların Metrik Performanslarının Belirlenmesi", TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, 10. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı ,Ankara*

Lagüela, S., González-Jorge, H., Armesto J., Arias P., *2011, "Calibration And Verification Of Thermographic Cameras For Geometric Measurements", Infrared Physics & Technology, Volume 54, Issue 2, p. 92-99.*

Luhmann, T., Ohm, J., Piechel, J., Roelfs, T., *2010, "Geometrıc Calıbratıon Of Thermographıc Cameras", Commission V, WG V/5, Institute for Applied Photogrammetry and Geoinformatics, Jade University of Applied Sciences Oldenburg, Ofener Str. 16-19, D-26121 Oldenburg, Germany.*

Mccafferty, D. J. , *2007, " The Value Of İnfrared Thermography For Research On Mammals; Previous Applications And Future Directions" , Mammal Rev., Volume 37, No. 3, 207–223.*

McGlone, J. C., *2004, "Manuel of Photogrammery Fifth Edition", ASPRS, ISBN 1-57083-071-1, sayfa 652, 653*

Remondino, F., Fraser, C., *2006 "Digital Camera Calibration Methods: Considerations And Comparisons ", ISPRS Commission V Symposium 'Image Engineering and Vision Metrology', Commission V, WG V/1.*

Rizzi, A., Voltolini, F., Girardi, S., Gonzo, L., Remondino, F., *2007, "Digital Preservation, Documentation And Analysis Of Paintings, Monuments And Large Cultural Heritage With Infrared Technology, Digital Cameras And Range Sensors ", XXI International CIPA Symposium, Greece.*

Taşdemir, Ş, Ürkmez, A, Yakar, M., İnal, Ş., *2009, "Sayısal Görüntü Analiz İşleminde Kamera Kalibrasyon Parametrelerinin Belirlenmesi, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (Iats'09), 13, Karabük, Türkiye*

Yıldız, F., Karabörk, H., Yakar, M., Yılmaz, H.M., *2005, "Yersel Fotogrametride Kullanılan Metrik Olmayan Dijital Kameraların Kalibrasyonunda Kullanılan Yazılımların İncelenmesi Üzerine Bir Çalışma" Harita Dergisi, Sayı: 134, 61-70*