Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, Cilt 21, Sayı 1, ARAŞTIRMA

DOI: 10.17482/uujfe.61071

TERMAL KAMERALARDA KALİBRASYON ŞABLONLARININ PERFORMANS ANALİZİ

Aykut *DURGUT**
Özgün AKÇAY*

Alınma: 16.03.2015; düzeltme: 09.12.2015; kabul: 03.01.2016

Öz: Termal kameralar nesnelerin ısılarını görüntüye dönüştürmektedir. Kameralardan alınan görüntülerin yüksek hassasiyet gerektiren fotogrametrik çalışmalarda kullanılabilmeleri için mutlaka kalibre edilmeleri gerekmektedir. Kamera kalibrasyonu yöntemleri ile kamera parametreleri matematiksel olarak belirlenmektedir. Bu çalışmada kamera kalibrasyonu için geliştirilen birçok desen türünden biri olan ve en sık olarak kullanılan satranç tahtası deseni çalışmamızda termal kamerayı kalibre edebilmek için kullanılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, kamerayı kalibre edebilmek için kullanılan desenlerin boyutları ile kalibrasyon sonuçları arasında bir ilişki bulunduğu deneysel olarak ortaya konulmuştur. Büyük boyutlu kalibrasyon şablonunu ile elde edilen sonuçların daha küçük boyutlu şablonların sonuçlarına göre doğru olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Fotogrametri, Bilgisayar Görüsü, Kalibrasyon Deseni, Termal Kamera, Kalibrasyon, DLT.

Performance Analysis of Thermal Camera Calibration Patterns

Summary: Thermal cameras is transforming heat of objects to image. The thermal image must necessarily calibrated for high density photogrametric application. Camera parameters are mathematically determined by camera calibration methods. In this study, chessboard pattern, which is one of many pattern for camera calibration and most commonly used pattern, was used to calibrate thermal camera. As a result of studies was observed that relationship between the calibration results and dimensions of the pattern. Great dimensional calibration pattern results were found to be more accurate than small dimensional calibration pattern.

Keywords: Photogrammetry, Computer Vision, Calibration Pattern, Thermal Camera, Calibration, DLT.

1. GİRİŞ

Günümüzde nesnelerin görüntülerinin bilgisayar ortamına aktarılmasının önemi her geçen gün artmaktadır. Bilgisayar ortamında aktarılan görüntülerin metrik olarak kullanılma talebi de paralel olarak artmaktadır. Kameraların iç yöneltme elemanlarının değerlerinin bilinmemesinden dolayı metrik hesaplama sonuçlarında hatalar oluşmaktadır. Bu sorunu ortadan kaldırmak için kamera kalibrasyonu yapılmalıdır.

* Geomatik Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Çanakkale 18 Mart Üniversitesi, Çanakkale
İletişim Yazarı: Aykut DURGUT (adurgut@balikesir.edu.tr)

Kamera kalibrasyonu,objektif hatalar, fiziksel etkiler vb. dış faktörler dolayısı ile bozulmuş olan görüntünün düzeltilerek görüntü işlemeye hazır hale getirilmesi işlemidir. Diğer bir deyişle kamera kalibrasyonu, iki boyutlu görüntülerden metrik bilgi çıkarmak için gerekli bir ön işlemdir. Kalibrasyon teknikleri en genel biçimde Test alanı ile yapılan kalibrasyon ve kendi kendine kalibrasyon (self kalibrasyon) olmak üzere ikiye ayrılır.

Fotogrametrik kalibrasyon; üç boyutlu uzayda geometrisi iyi bilinen bir kalibrasyon objesine yapılan gözlemlerle gerçekleştirilmektedir. Self kalibrasyon tekniğinde ise, herhangi bir kalibrasyon objesi kullanılmamaktadır. Bu yaklaşım çok esnek olmasına rağmen, yaygın biçimde kullanılmamaktadır.

Bir kamerayı kalibre etmek için, uygun matematik modeline ihtiyaç duyulmaktadır. En iyi bilinen modeller; Pinhole Model, Doğrudan Lineer Dönüşüm Modeli (DLT) ve doğrusallık koşulu (Kollinearite)'dir.

Termografik görüntülerin elde edilmesine yarayan termal kameralar elektromanyetik spektrumun kızılötesi bölümündeki (0.9 –14 μm) cisimlerden yayılan ışınımın uzaktan algılanmasını sağlar. Yeryüzünde bulunan bütün cisimler belli bir sıcaklığa sahip olmalarından dolayı kızılötesi ışınım yaparlar. Bu cihazla normalde çıplak gözle görülemeyecek sorunları tespit edilebilmektedir. Termal kamera, kızılötesi dalga boyu spektrumunda, ekipmanla doğrudan temas gerçekleştirmeksizin sıcaklık modellerini algılayan bir cihazdır. (Soldan, Rangel, & Kroll, 2011)

M. Gianinetto 2005 yılında yaptığı çalışmada kalibrasyon için poligon şeklinde yeterli sayıda termal noktanın olduğu bir şablon geliştirmiştir. Geliştirdiği şablonla termal kameradan alınan görüntülerin kameraya olan mesafesi ve kalibrasyon sonuçlarına etkisi üzerine çalışma yapmıştır. Çalışma sonucunda yakın çekilen resimlerin daha doğru sonuç verdiğini savunmuştur. (Gianinetto, F. Roncoroni, & M. Scaioni, 2005)

S. Lagüela ve ekibinin 2011 yılında yaptığı çalışmada çeşitli büyüklerde 7 küp ve çeşitli şekiller ve lambalardan oluşturduğu başka bir şablon kullanmıştır. Aynı zamanda çalışmasında iki farklı termal kamera kullanarak bunlarında kıyaslamasını yapmıştır. Çalışma sonucunda lambalardan oluşturduğu şablonun ve bir kameranın diğerinden daha iyi sonuçlar elde ettiğini ortaya koymuştur. (Lagüela, González-Jorge, & Armesto, 2011)

Andreas Ellmauthaler, yaptığı çalışmada ufak ışık kullanarak kalibrasyon için şablon ve algoritma geliştirmiştir. Kullanılan ufak lambalar termal kamerada daha net tespit edildiğinden kalibrasyon noktaları net olarak tespit edilmiş ve kalibrasyon sonucu oluşan hataların azaldığını tespit etmiştir. (Ellmauthaler, Eduardo A. B. da Silva, Carla L. Pagliari, & Jonathan N. Gois, 2013)

Başka bir çalışmada Zhang Yu, stereo görüşlü kamera sistemi için küçük daire şeklinde ısıtıcılar kullanarak şablon tasarlamıştır. Çalışması sonucunda dış ortamlarda büyük alanları görüntülerken düşük hata oranı olduğunu ve uygulamanın kolay ve etkili sonuç verdiğini tespit etmiştir. (Yu, Shen Lincheng, Zhou Dianle, & Zhang Daibing, 2013),

Vidas ve arkadaşları, termal kamera kalibrasyonu için ışık ve ısıtma gerektirmeyen şablon tasarlamıştır. Çalışmada, ısınmış bilgisayar kasasının üzerine emisiti değeri düşüş kareler şeklinde kesilmiş şablon yerleştirerek kalibrasyon yapmışlardır. Bu uygulamanın sonucunda şablonun ek donanıma ihtiyaç duymadan net görüntü elde edildiğini ve iz düşüm hatasının %78 azaldığını tespit etmiştir. (Vidas, Lakemond, Denman, & Fookes, 2012)

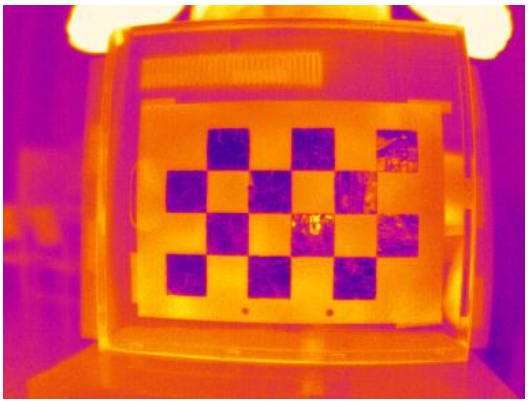
Bu çalışmada dijital kamera kalibrasyonunda şıkça kullanılan satranç tahtası modeli üzerine termal kameralar için geliştirilen çeşitli boyutlarda ve ısılarda ki şablonların kalibrasyon sonuçları kıyaslaması yapılmıştır.

2. TERMAL KAMERALAR

Termo grafik kameralar elektromanyetik spektrumun kızılötesi bölümündeki(kabaca 900–14,000 nanometre veya 0.9–14 μm) elektromanyetik ışınımı tespit ederler ve bu ışınımdan resimler oluştururlar. Kızılötesi ışınım sıcaklıklarına göre tüm cisimlerden salınır. Bir cisim

tarafından salınan ışınımın miktarı sıcaklık arttıkça artar, bu yüzden termografi sıcaklıktaki farkları görmemizi sağlar. Termografik bir kamera tarafından görüntülendiklerinde, sıcak cisimler daha soğuk arka planların yanında oldukça göze çarpar; insanlar ve diğer sıcak kanlı hayvanlar, gündüz veya gece, çevrede rahatlıkla görülebilir hale gelir. Termal kameralar elektrikli ekipmanları ve süreç ekipmanlarını denetlemek, sağlık, savunma ve bina tanılamaları için kullanılabilir.

Termal kamerayla çekilen ısı görüntüleri Resim 1'de görüldüğü gibi çok sıcak noktaları açık renkle, soğuk noktaları ise koyu renkle göstererek problemin kaynağını kolayca bulunmasına yardımcı olur. Termal kameralar ortamın durumunu siyah - beyaz veya renkli gösterirler. Renkli olarak gösterdiği durumlarda bir standart olmasa da genel olarak görüntü işleme programlarında ortam sıcaklığına göre maviden sarıya kırmızı rengi kullanarak geçer. Mavi en soğuk, sarı ise en sıcak bölgeleri gösterir.



***Şekil 1**. Termal kamera görüntüsü*

3. KAMERA KALİBRASYONU

Kalibrasyon, bir ölçü sisteminin özellikleri arasındaki ilişkileri göstermek için belirlenen sayısal değerler sisteminin geliştirilmiş şeklidir. Kamera kalibrasyonu resim koordinat sistemi ile gerçek dünya koordinat sistemini arasındaki ilişkiyi kurmaya yardım eder. Fotogrametrik kameralar periyodik olarak laboratuar ortamında kalibrasyona tabi tutulurlar. Fotogrametrik kamera kalibrasyonu, kamera sistemini en iyi şekilde ifade eden parametrelerin bulunması olarak ifade edilir. Bu parametreler bilindiği gibi resim çekme merkezinin uzaklığı(odak uzaklığı, c), resim ana noktasının koordinatları, resim koordinat sistemi eksenlerinin yönleri ve dönüklükleri ile distorsiyon parametreleridir. (Taşdemir, Ürkmez, Yakar, & İnal, 2009)

3.1. Mercek Distorsiyonları

Merceklerin fiziki özelliklerinden dolayı iz düşümde oluşan etkilere distorsiyon adı verilir. Mercek distorsiyonu resim düzleminde resim noktasının yerinde meydana gelen değişiklikle ilgilidir. Kameralarda Radyal Distorsiyon ve Teğetsel Distorsiyon olmak üzere iki ana distorsiyon bulunmaktadır.

3.1.1. Radyal (Açısal) Distorsiyon

Eksen dışı bir hedefin görüntüsü ana noktadan radyal olarak ya uzak yada yakın yer değiştirmişse, resim radyal olarak distorsiyona uğramış demektir. Ana noktadan uzak veya yakın radyal olarak distorsiyona uğramış dörtgen şekil pozitif(yastık) veya negatif (fıçı) distorsiyon olarak adlandırılır.

Radyal bozunma eşitliğinde K1,K2,K3,… katsayıları radyal distorsiyon katsayıları olarak isimlendirilmektedir. Bu katsayıların etkileri ana noktayla olan mesafenin kuvvetleri ile orantılıdır(1).

$$\delta_r = K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6 + \cdots \quad (1)$$

Eşitlikteki mesafenin başlangıç noktası ana noktadır. Ana noktadan görüntü çevresine doğru mesafe ile doğru orantılı olarak distorsiyon etkisi devam eder. Ana noktaya olan uzaklık (2) deki formül ile hesaplanır.

$$r^2 = (x - x_p)^2 + (y - y_p)^2 \quad (2)$$

Şekil 2.:
Radyal Distorsiyon Çeşitleri

3.1.2. Teğetsel(Tanjant) Distorsiyon

Kameralardaki mercekler üretim aşamasında aynı doğrultuda yerleştirilememektedir. Bu doğrultudan sapma nedeniyle teğetsel (tanjant) distorsiyon denilen geometrik yer değiştirmeye sebep olacaktır. (Şekil 2). Teğetsel distorsiyon aşağıdaki denklemler (3, 4, 5) ile hesaplanabilmektedir.

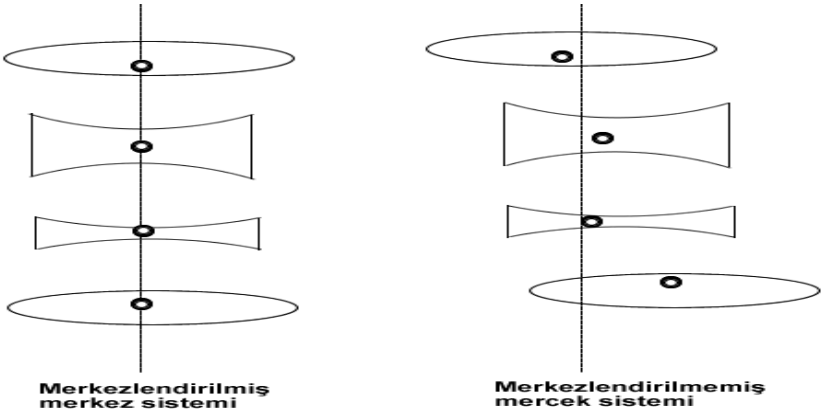
$$\Delta x_s = q[p_1(r^2 + 2(x_d - x_p)^2) + 2p_2(x_d - x_p)(y_d - y_p) \ ] \quad (3)$$

$$\Delta y_s = q[p_2(r^2 + 2(y_d - y_p)^2) + 2p_1(x_d - x_p)(y_d - y_p) \ ] \quad (4)$$

$$r = ((x_d - x_p)^2 + (y_d - y_p)^2))_2^1 \quad \text{ve} \quad q=(1+p_3r^2) \quad (5)$$

3.2. Kamera Kalibrasyonu Matematiksel Metotları

Kameralardaki hataları gidermek için geliştirilmiş olan matematiksek modeller ile odak uzaklığı, ana nokta koordinatları, distorsiyon parametreleri ve kamera yöneltme parametreleri gibi kameranın iç ve dış yöneltme parametreleri hesaplanabilmektedir. Bu parametrelere kalibrasyon parametreleri denilmektedir. (R. Yang, 2011)



Şekil 3:
. Teğetsel Distorsiyon

3.2.1. DLT (Direct Linear Transformasyon) Matematik Modeli

Bu yöntemin en büyük avantajı, çözümün lineer olması ve yaklaşık değer probleminin olmamasıdır. DLT eşitlikleri ile direkt olarak resim koordinatlarından uzay koordinatlarına ulaşmak mümkündür. 11 parametreye ilave edilmiş parametrelerle birlikte DLT eşitlikleri aşağıdaki denklemlerde verilmiştir (Abdel-Aziz & Karar, 1971). Resim koordinat sistemi ile cisim koordinat sistemi arasındaki ilişki matematiksel olarak Denklem 6 ve 7'deki gibi ifade edilir.

$$u\text{-}u0 = \frac{d}{\lambda_u}\frac{r_{11}(x-x_0)+r_{12}(y-y_0)+r_{13}(z-z_0)}{r_{31}(x-x_0)+r_{32}(y-y_0)+r_{33}(z-z_0)} \tag{6}$$

$$v\text{-}v0 = \frac{d}{\lambda_v}\frac{r_{21}(x-x_0)+r_{22}(y-y_0)+r_{23}(z-z_0)}{r_{31}(x-x_0)+r_{32}(y-y_0)+r_{33}(z-z_0)} \tag{7}$$

Burada, $u0, v0$: ana noktanın resim koordinatları,
u, v: noktanın resim noktaları,
r_{ij} dönme matrisi elemanları,
x, y, z:noktanın cisim koordinatları,
λ_u, λv:birim dönüşümü katsayıları,
d: ölçek faktörü(21),
L1,….L11 : Kamera kalibrasyon parametreleridir ve Denklem 10 ile Denklem 20 arasındaki denklemler ile ifade edilmektedir.
Bu eşitliği tekrar düzenleyerek Denklem 8 ve 9 daki eşitliği elde ederiz.

$$u = \frac{L_1\, x \pm L_2 y + L_3\, z + L_4}{L_9 x + L_{10}\, y + L_{11} z + 1} \tag{8}$$

$$v = \frac{\mathrm{L}_5 x + \mathrm{L}_6 y + L_7 z + L_8}{\mathrm{L}_9 \mathrm{x} + \mathrm{L}_{10}\, \mathrm{y} + \mathrm{L}_{11} \mathrm{z} + 1} \tag{9}$$

$$L_1 = \frac{u_0 r_{31} - d_u r_{11}}{D} \tag{10}$$

$$L_2 = \frac{u_0 r_{32} - d_u r_{12}}{D} \tag{11}$$

$$L_3 = \frac{u_0 r_{33} - d_u r_{13}}{D} \tag{12}$$

$$L_4 = \frac{(d_u r_{11} - u_0 r_{31})x_0 + (d_u r_{12} - u_0 r_{32})y_0 + (d_u r_{13} - u_0 r_{33})z_0}{D} \tag{13}$$

$$L_5 = \frac{v_0 r_{31} - d_v r_{21}}{D} \tag{14}$$

$$L_6 = \frac{v_0 r_{32} - d_v r_{22}}{D} \tag{15}$$

$$L_7 = \frac{v_0 r_{33} - d_v r_{23}}{D} \tag{16}$$

$$L_8 = \frac{(d_v r_{21} - v_0 r_{31})x_0 + (d_v r_{22} - v_0 r_{32})y_0 + (d_v r_{23} - v_0 r_{33})z_0}{D} \tag{17}$$

$$L_9 = \frac{r_{31}}{D} \tag{18}$$

$$L_{10} = \frac{r_{32}}{D} \tag{19}$$

$$L_{11} = \frac{r_{33}}{D} \tag{20}$$

$$D = -(x_0 r_{31} + y_0 r_{32} + z_0 r_{33}) \qquad d_u = \frac{d}{\lambda_u} \qquad d_v = \frac{d}{\lambda_v} \tag{21}$$

Bu denklemlerden L1,L2,L3,….,L11 katsayılarına DLT parametreleri denilmektedir. Bunlar cisim uzayı referans düzlemi ile resim düzlemi arasındaki ilişkiyi yansıtırlar. Kamera lenslerinin optik distorsiyon hataları dikkate alınırsa eşitlik Denklem 22 ve 23'teki gibi düzenlenir.

$$u - \Delta u = \frac{L_1 x \pm L_2 y + L_3 z + L_4}{L_9 x + L_{10} y + L_{11} z + 1} \tag{22}$$

$$v - \Delta v = \frac{L_5 x + L_6 y + L_7 z + L_8}{L_9 x + L_{10} y + L_{11} z + 1} \tag{23}$$

Burada Δu ve Δv optik distorsiyon nedeniyle oluşan hatalardır.

3.2.2. Lineer Olmayan Optimizasyon

Lineer algoritmaların dezavantajlarından dolayı maksimum olasılık tahminlemesi süresince başlangıç parametreleri rafine edilmesi gereklidir. Kamera modelinin lineer olmayan özelliklerinden dolayı parametrelerin eşzamanlı tahminlemesi iteratif algoritma uygulaması içerir. Levenberg–Marquardt optimizasyon yöntemi bu sorunun çözümü için bir yöntemdir. Bu yöntemle iterasyon sayısı kayda değer şekilde azalır ve en iyi çözüm güvenilir şekilde başarılabilir.

Parametre optimizasyon metodu, gerçek resim noktaları ve hesaplanan resim noktaları arasındaki piksel mesafesini en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Bu işlem 4 adımda geliştirmektedir.

- Gerçek dünya koordinat sistemindeki M_w noktasını kamera koordinat sistemindeki M_c noktasına dönüştürmek.
- Asıl parametrelerin değerleri uygulanan Resim düzlemi Mc noktası tasarlanır. Hesaplanan distorsiyonsuz resim noktaları $\widehat{m}_u$ olarak ifade edilir.
- Distorsiyonlu resim noktaları için $\widehat{m}_d^u$, $\widehat{m}_u$ dan hesaplanır.
- Hesaplanan $\widehat{m}_d^u$ ve tespit edilen m_d^u karşılaştırılır ve resim noktaları setleri arasında farkları en aza getirmek için Denklem 24'teki formül kullanılır.

$$\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{L}||m_{u,i,j}^d - \widehat{m}_{u,i,j}^d(f_x, f_y, u_0, v_0, k_1, k_2, R_i, t_i)||^2 \tag{24}$$

i: Resim sıra numarası

j: Her resimdeki nokta sıra numarası

$R\ ve\ t$: Extrinsic parametreler

f_x, f_y: x ve y koordinatında kameranın odak uzaklığı etkisidir

u_0, v_0: Kameranın ana nokta koordinatlarıdır

$k_1\ ve\ k_2$: Radyal distorsiyon katsayısı

R: Dünya koordinattan kamera koordinata dönüşüm için 3x3 ortogonal dönme matrisi

t: Dünya koordinattan kamera koordinata dönüşüm için 3x1 dönüşüm vektörü

Denklem 9'un minimizasyonu için lineer olmayan optimizasyon problemlerinin çözümü için kullanılan Levenberg–Marquardt algoritması kullanılabilir.

4. MATERYAL-METOT

4.1. Kullanılan Kamera

Çalışmada PI450 model termal kamera kullanılmıştır. PI450 saniyede 96 resim ve 32 Hz ile gerçek zamanlı termal görüntü alabilmektedir. Detaylı teknik özellikleri Tablo 1 de listelenmektedir.

Tablo 1. PCE PI450'nin Teknik özellikleri

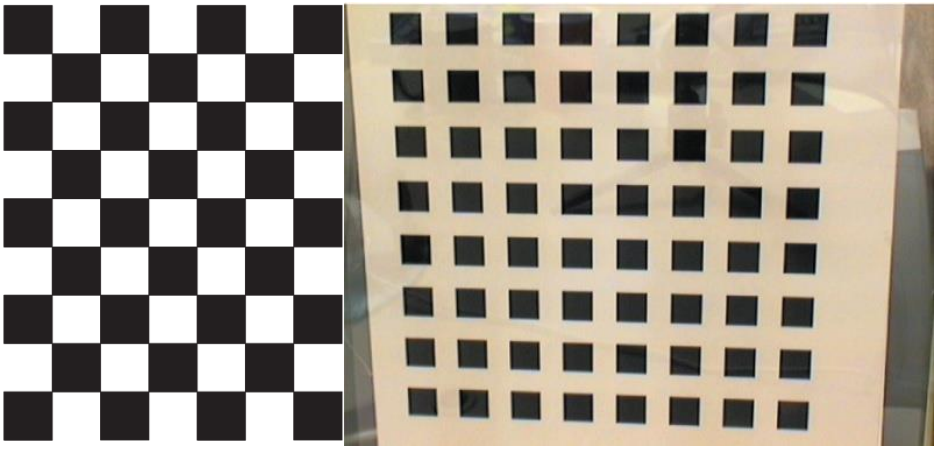
Detektör	FPA, soğutulmamış (25 x 25 µm)
Optik çözünürlük	382 x 288 Piksel
Spektral aralık	7,5 ... 13 µm
Sıcaklık aralığı	-20 ... +100 °C, 0 ... +250 °C, +150 ... +900 °C ek aralık: +200 ... +1500 °C (Optik 72 ° HFOV mevcut değildir)
Görüntü frekansı	80 Hz
Optikler (FOV)	38 ° x 29 ° FOV / f = 15 mm, +900 °C' ye kadar veya 62 ° x 49 ° FOV / f = 8 mm ,+900 °C' ye kadar veya 13 ° x 10 ° FOV / f = 41 mm, +900 °C' ye kadar veya 38 ° x 29 ° FOV / f = 15 mm, +1.500 °C' ye kadar veya 62 ° x 49 ° FOV / f = 8 mm, +1.500 °C' ye kadar veya 13 ° x 10 ° FOV / f = 41 mm, +1.500 °C' ye kadar
Termik hassasiyet (NETD)	38 ° x 29 ° FOV ile 0,04 K / F = 0,8 62 ° x 49 ° FOV ile 0,04 K / F = 0,8 13 ° x 10 ° FOV ile 0,06 K / F = 1,0
Sistem hassasiyet	± 2 °C veya ± 2 %
PC-Ara yüz	USB 2.0
Süreç-Ara yüz (PIF)	0 ... 10 V Giriş, dijital Giriş, 0 ... 10 V Çıkış
Çevresel sıcaklık	0 ... +70 °C

Depolama sıcaklığı	-40 ... +85 °C
Bağıl Nem	20 ... 80 % b.N., buğulaşmayan
Gövdenin boyutları	46 x 56 x 90 mm
Gövdenin Koruma Sınıfı	IP 67 (NEMA 4)
Ağırlık	320 gr., Lens dahil
Shock / Vibrasyon	25G, IEC 68-2-29 / 2G, IEC 68-2-6
Tripod girişi	1/4-20 UNC
Güç kaynağı	USB üzerinden

Şekil 4:
PI450 termal kamera

4.2. Termal Kamera Kalibrasyonu

Kalibrasyon metotları 2 ana kategoriden oluşmaktadır: geleneksel kalibrasyon ve kendi kendine kalibrasyon. Geleneksel kalibrasyonda satranç tahtası (Yang, Huang, & Gao, 2010), daire ve halka şablonu kullanılmaktadır (Songand & Wang, 2006) (Vidas, Moghadam, & Bosse, 2013). Çalışmalarda kullanılan şablonların boyutları değişmektedir. Şablonlarda kullanılan köşe sayıları 10X10, 7X9 gibi çeşitli aralıklarda ve şablonun genel boyutu değişmektedir.



Şekil 5:
Örnek Kalibrasyon Şablonları

Termal kameralar nesnelerden yayılan ısıları algıladığından kalibrasyon için hazırlanan şablonunda farklı düzeylerde ısı yayması gerekmektedir. Termal deseni sağlamak için en çok kullanılan satranç deseni üzerindeki siyah alanlar alüminyum bant ile kapatıldı. Alüminyum, emisiviti değeri düşük olduğundan daha az ısınacak ve şablonun zemini ile arasında fark

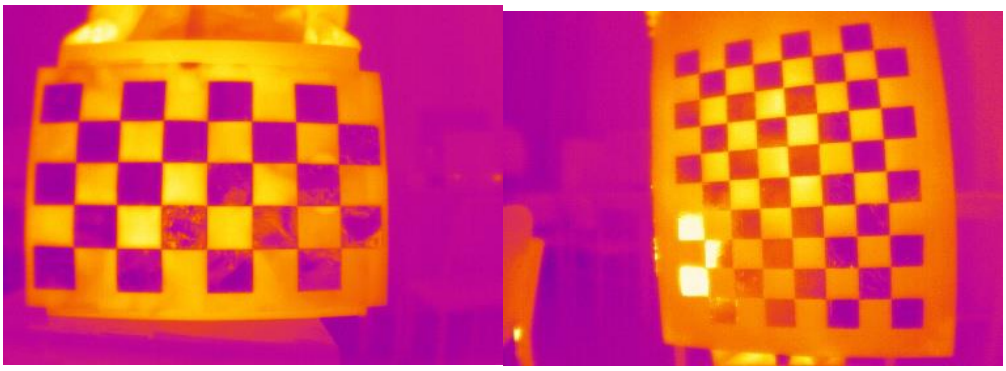
oluşturacağı için kullanılmıştır. Beyaz alanlar ise boş bırakıldı. Şablonlar ısıtıcı ile ısıtılarak alüminyum ile kapalı alanlar ve arka plan arasında ısı farkı yaratıldı. Başka şablon tipi olarak 6 cm aralıkla yerleştirilen küçük ampuller ve çit teli ısıtılarak kullanılmıştır. Işıkların donanımından ve çit telinin sıcaklığını koruma zorluğundan bu sistemlerden verimli termal görüntü alınamamıştır.

Performans analizi için 3, 4, 5 cm boyutlarında çeşitli şablonlar tasarlandı. Şablonların boyutları A4 ve A3 kağıtları ebatlarındadır. Uygulamada kullanılan şablon özellikleri Tablo 2'de listelenmiştir.

Tablo 2 Performans analizi için kullanılan şablonların özellikleri

	Şablon dış boyut (cm)	**Satranç karesi Boyutu (cm)**	**Kare sayısı**
Şablon 1	50*40	5*5	8*10
Şablon 2	25*40	5*5	5*8
Şablon 3	18*27	3*3	6*9
Şablon 4	15*21	3*3	7*5
Şablon 5	24*36	4*4	6*9

Tasarlanan şablonların ısıtıcı ile ısıtılarak termal kamera karşısında 12 farklı açıdan görüntüleri alınmıştır. Alınan görüntüler Matlab Camera Calibration Toolbox (Bouguet, 2010) ile kalibrasyon edilmiştir.



Şekil 6. *Kullanılan Kalibrasyon Desenleri*

Tablo 3'de Matlab programı ile şablonların kalibrasyon sonuçları görülmektedir. Tablodaki parametrelerin anlamları:

Odak uzaklığı: 2x1 vektörde saklanan piksel olarak odak uzaklığıdır.

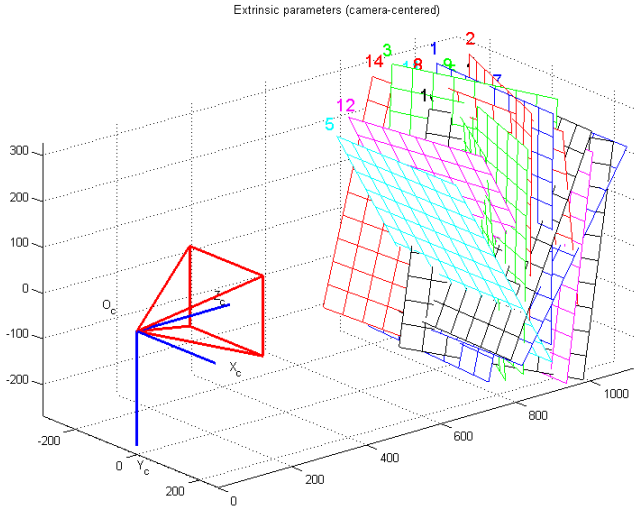
Ana nokta: 2x1 vektörde saklanan ana nokta koordinatlarıdır.

Çarpıklık: x ve y pikselleri arasındaki açıdır

Distorsiyon katsayıları: 5x1 olarak saklanan radyal ve tanjantsa distorsiyonlardır.

Kalibrasyon şablonundaki satranç karesi eşit olduğunda şablonun ebat olarak büyük olması sonuçlar üzerinde fark yaratmadığı Grafik 1 ve Grafik 2 den anlaşılmaktadır.

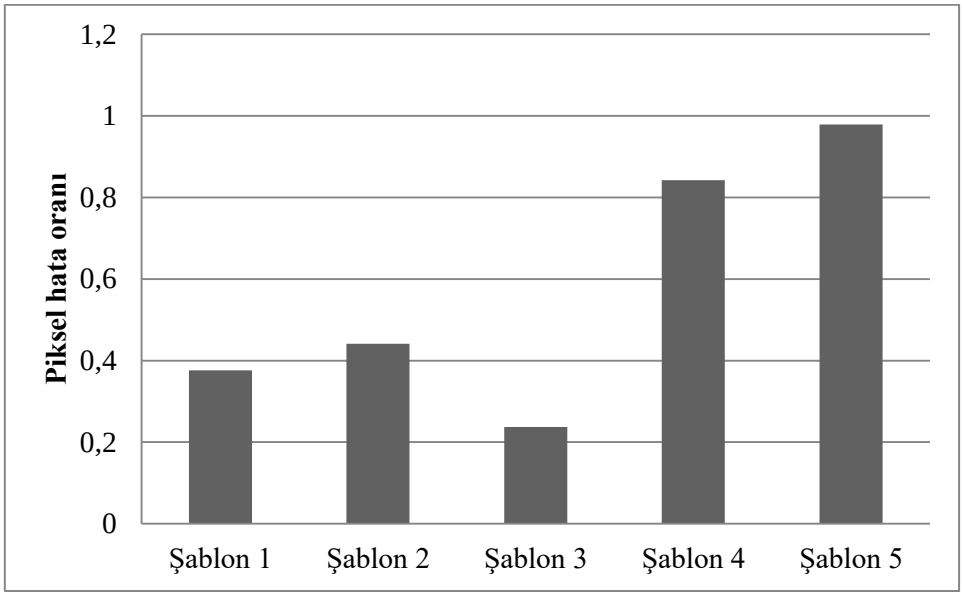
Tasarlanan Şablon 3 ve Şablon 4'te karenin boyutları küçültülerek termal kameradan görüntüsü alınmıştır. Matlab ile kalibrasyon sonucu Tablo 3'da gösterilmektedir. Karenin boyutunun küçülmesi ile odak uzaklığı ve ana noktanın sapma oranı artmıştır.



Şekil 7:
Şablon 1'in Görüntüleme Açıları

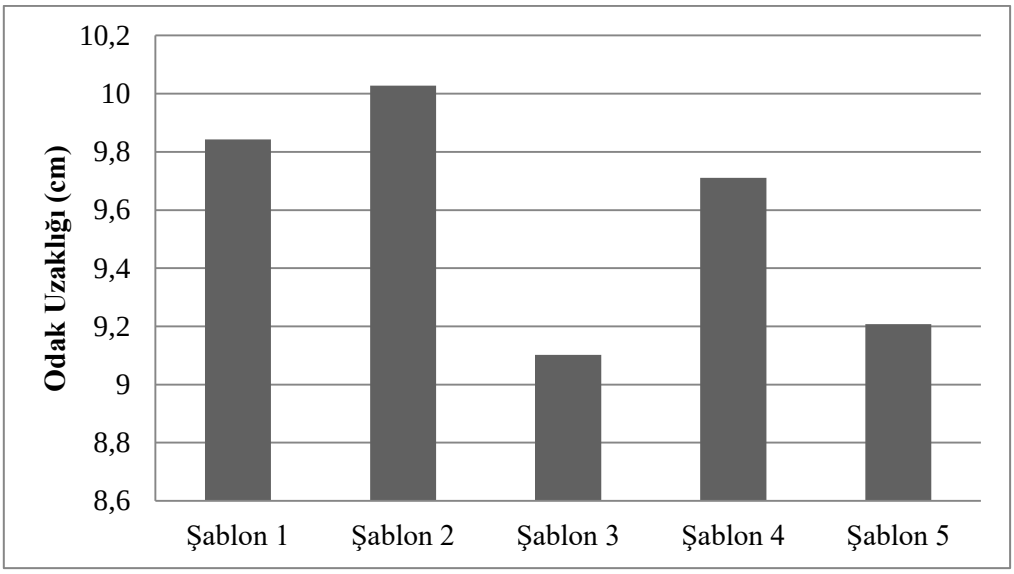
Tablo 3 Şablonların kalibrasyon sonuçları

	Odak uzaklığı (fc) (mm)	Ana nokta (mm)	Çarpıklık (alpha_c)	Distorsiyon Katsayıları (kc)	Pixel hatası
Şablon 1	9.8645514 9.8588237	5.0403125 3.7967708	[0.00000] ± [0.00000]	[-0.41135 0.25431 0.00422 -0.00040 0.00000]± [0.04116 0.21500 0.00152 0.00195 0.00000]	[0.37595 0.35876]
Şablon 2	10.0305899 9.9610394	5.0403125 3.7967708	[0.00000] ± [0.00000]	[-0.39447 0.17413 0.00791 -0.00375 0.00000] ± [0.06693 0.28428 0.00421 0.00371 0.00000]	[0.44102 0.40962]
Şablon 3	9.1053423 9.0979075	5.0792332 3.9413982	[0.00000] ± [0.00000]	[-0.39479 0.65871 0.00138 -0.00158 0.00000]± [0.15937 1.13388 0.00670 0.00730 0.00000]	[0.23756 0.33139]
Şablon 4	9.7178625 9.6872422	5.2153286 4.0431104	[0.00000] ± [0.00000]	[-0.23752 0.12065 0.00093 -0.00182 0.00000] ± [.10946 0.49580 0.00583 0.00550 0.00000]	[0.84242 0.80425]
Şablon 5	9.2253231 9.1588786	5.0801971 3.9389651	[0.00000] ± [0.00000]	[-0.31120 0.68864 - 0.00546 -0.00515 0.00000] ± [0.08151 0.30349 0.00589 0.00581 0.00000]	[0.97895 1.03893]

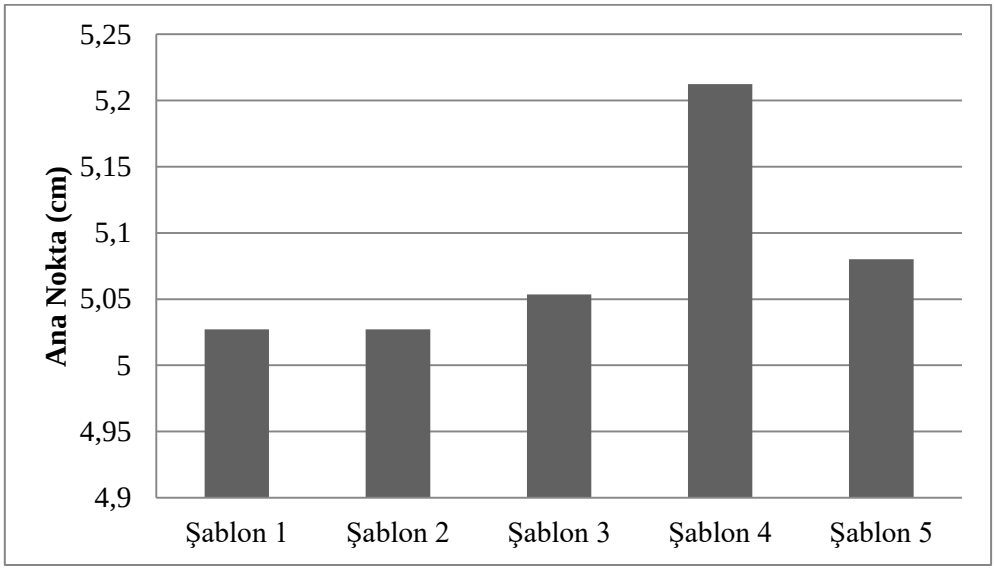


Şekil 8:
Piksel hatası kıyaslama

Grafik 1'deki piksel hatası kıyaslaması sonucunda, Şablon 5 ve Şablon 3'ün kare sayıları aynı olmasına rağmen dış boyutları ve kare boyutlarındaki farklardan dolayı Şablon 3'ün piksel hatası daha düşük oranda çıkmıştır.



Şekil 9. *Odak uzaklığı kıyaslaması*



Şekil 10:
Ana nokta kıyaslaması

Kalibrasyon şablonlarının sıcaklığının sonuçlara etkisini inceleyebilmek için şablon sıcaklığı değiştirilerek görüntüler alınmış ve kalibrasyon işlemine tabi tutulmuştur. Aynı şablonun 30°C ve 38°C olarak alınan görüntülerinin kalibrasyon sonuçları Tablo 4 de görülmektedir.

Tablo 4. Şablonun 30°C ve 38°C olarak alınan görüntülerinin kalibrasyon kıyaslamaları

	Şablon 30 ^{o}C	Şablon 38 ^{o}C
Odak uzaklığı (mm)	11.8754886 11.6568475	10.75060728 10.61453678
Ana nokta (mm)	5.242309374 3.7967708	5.0403125 3.859849833
Çarpıklık (alpha_c)	[0.00000] ± [0.00000]	[0.00000] ± [0.00000]
Distorsiyon Katsayıları (kc)	[-0.56299 2.28574 -0.01161 0.00694 0.00000] ± [0.12454 0.96594 0.00367 0.00450 0.00000]	[-0.50479 -0.76020 0.00736 0.06397 0.00000] ± [0.21649 1.00587 0.00876 0.07825 0.00000]
Pixelerror (err)	[0.97624 0.94101]	[0.92367 0.89897]

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Termal kamera için alüminyum kullanılarak hazırlanan çeşitli ebatlardaki şablonlar ısıtıldıktan sonra termal kamera ile görüntüsü alınmıştır. Matlab Camera Calibration Toolbox programı ile kalibrasyon testi sonucunda elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında şablonlardaki karenin ve genel şablonun boyutunun küçülmesi ile odak uzaklığındaki ve ana noktadaki standart sapma oranı artmıştır. Bunun nedeni termal kameranın çözünürlüğünün düşük olması olarak düşünülmektedir.

Şablon 1'in çeşitli sıcaklıklarda görüntüsü alınarak kalibrasyon işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlem sonucunda piksel hatasının sıcak olan görüntülerden alınan sonuçta daha düşük olduğu Tablo 4'de görülmektedir. Diğer sonuçlarında benzer şekilde sıcak olan şablondan daha doğru çıktığı görülmüştür. Bu sebeple termal kamera kalibrasyonu yapılacağında kalibrasyon şablonunun iyi ısıtılarak noktaları arasındaki farkın net olarak görünmesi sağlanarak doğru sonuçlar elde edilebilir.

Kalibrasyon sonuçlarından biri olan piksel hatası Grafik 1'de görüldüğü gibi aynı kare boyutu kullanılan Şablon 3 ile Şablon 4 arasındaki farkın temeli Şablon 3'te daha küçük alanda daha az kare ile çalışılmasıdır. Benzer şekilde Şablon 1 ile Şablon 2 arasında da kare boyutu aynıdır ve çalışma alanları ile kare sayısı da yakın olduğundan piksel hata oranları da yakın olarak tespit edilmiştir. Aynı zamanda Şablon 1 ve Şablon 2 odak uzaklığı kıyaslandığında Grafik 2'de görüldüğü gibi çıkan sonuçlar çok yakındır.

Çalışma sonucunda elde edilen ana nokta kıyaslamasına bakıldığında Şablon 4'ün küçük alanda fazla kare sayısı ile çalışmasından dolayı sonuç diğer şablonlardan farklı çıkmıştır. Diğer şablonlarda ana nokta değerlerinin çok yakın bulunduğu Grafik 3'te de görülmektedir.

Termal kameraların kalibrasyonu yapılırken kullanılacak şablonların boyutları büyük tasarlanmalı ve görüntünün genelini kapsamalıdır. Bunun sonucunda kalibrasyon sonucu hata oranı düşük olması beklenilmektedir. Termal kameranın kalibrasyon değerlerinin düzgün çıkması ile termal nesnelerin yerinin tespiti ve uzaklığının hesaplama sonuçlarındaki hata oranı düşecektir. Böylece bir robot tasarlandığında termal nesnelerin yerini tespit ederek gerekli işlemleri yapabilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 114Y005 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

1. Abdel-Aziz, Karar, Y. (1971). Direct Lineer Transformation from Comparator Coordinates into Object Space Coordinates in Close-Range Photogrammetry. *Proceedings of theSymposium on Close-RangePhotogrammetry*, 1-18.

2. Bouguet. (2010). *Camera Calibration Toolbox for Matlab.* Camera Calibration Toolbox for Matlab: http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/ adresinden alınmıştır

3. Ellmauthaler, A., Eduardo A. B. da Silva, Carla L. Pagliari, Jonathan N. Gois. (2013). A novel iterative calibration approach for thermal infrared cameras. *In Image Processing (ICIP), 2013 20th IEEE International Conference on* , 2182-2186. doi: 10.1109/ICIP.2013.6738450

4. Gianinetto, M., F. Roncoroni, M. Scaioni. (2005). Calıbratıon of close-range thermal ımagery for ıntegratıon ınto 3d vr models. 2191.

5. Lagüela, S., González-Jorge, H., Armesto, J. (2011). Calibration and verification of thermographic cameras for geometric measurements. *Infrared Physics & Technology*, 92-99. doi:10.1016/j.infrared.2011.01.002

6. R. Yang, W. Y. (2011). Geometric calibration of IR camera using trinocular vision. *Lightwave Technology, vol. 29, no. 24*, 3797-3803.doi: 10.1109/JLT.2011.2170812

7. Soldan, S., Rangel, J., Kroll, A. (2011). An Overview of Calibration Boards for the Geometric Calibration of Thermal Cameras., *InfraR&D 2011*,79-83.

8. Songand, L., Wang, M. (2006). High precision camera calibration in vision measurement. *Opt. Laser Technol.*, 1413-1420. doi:10.1016/j.optlastec.2006.10.006

9. Taşdemir, Ş., Ürkmez, A., Yakar, M., İnal, Ş. (2009). Sayısal görüntü analiz işleminde kamera kalibrasyon parametrelerinin belirlenmesi. *5.Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), 13-15 Mayıs 2009, Karabük, Türkiye*

10. Vidas, S., Lakemond, R., Denman, S., Fookes, C. (2012). A Mask-Based Approach for the Geometric Calibration of Thermal-Infrared Cameras. *IEEE Transactıons on ınstrumentatıon and measurement, Vol. 61, No. 6*, 1625-1635. doi: 10.1109/TIM.2012.2182851

11. Vidas, S., Moghadam, P., Bosse, M. (2013). 3D thermal mapping of building interiors using an RGB-D and thermal camera. *in Robotics and Automation*, 2311-2318. doi: 10.1109/ICRA.2013.6630890

12. Yang, X., Huang, Y., Gao, F. (2010). A simple camera calibration method based on sub-pixel corner extraction of the chess board image. *IEEE Int. Conf. ICIS, Xiamen*, 688-692.doi: 10.1109/ICICISYS.2010.5658280

13. Yu, Z., Shen Lincheng, Zhou Dianle, Zhang Daibing. (2013). Camera Calibration of Thermal-Infrared Stereo Vision System. *2013 Fourth International Conference on Intelligent Systems Design and Engineering Applications*, 197-201.doi: 10.1109/ISDEA.2013.449

14. Zhang, Z. (2000). A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1330-1334.doi: 10.1109/34.888718

15. Zhang, Z. (2004). Camera Calibration with One-Dimensional Objects . *IEEE Transcations on pattern analysis and machine intelligence*, 892-899. doi: 10.1109/TPAMI.2004.21