

Sayısal Kameraların Self-Kalibrasyonu için Bir Yazılım Tasarımı (Software Design for Self-Calibration of Digital Cameras)

Ferruh YILMAZTÜRK¹, Sıtkı KÜLÜR²

¹Aksaray Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Aksaray

²İTÜ, Geomatik Mühendisliği Bölümü, İstanbul

fyilmazturk@gmail.com

ÖZET

Fotogrametrik uygulamalarda, kamera kalibrasyon ve yöneltme işlemleri görüntülerden hassas ve güvenilir 3B bilgiler elde etmek için gerekli bir önkoşuldur. Bu amaçla farklı yöntem ve modellerin kullanılmasına rağmen self kalibrasyonlu demet dengelemesi, en doğru, sağlam ve çok yönlü sonuçlar veren kalibrasyon yöntemi olarak bilinir. Bu çalışmada, self kalibrasyonlu demet dengelemesi için Borland C++ Builder programlama dili kullanılarak geliştirilen ve yarı otomatik çözümler üreten bir yazılım anlatılmış, kullanılan matematik model, parametre kestirimi ve kalibrasyon ve konum belirlemenin kalite analizi verilmiştir. Yazılımı test etmek için Canon A95 sayısal resim çekme makinesinin kalibrasyonu ve 3 adet Basler A302FC video kamerasının eşzamanlı kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon sonuçları test edilmiş, her iki uygulama için sırasıyla cisim uzayındaki bağıl doğruluk, cisim boyutunun 1/38.000 ve 1/20.000'i ve resim uzayındaki doğrulukta bir pikselin 1/10 ve 1/26'si olarak elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Self-kalibrasyon, yazılım, resim ölçmeleri, 3B Ölçmeler, doğruluk.

ABSTRACT

In photogrammetric applications, the camera calibration and orientation procedures are a necessary prerequisite for the extraction of precise and reliable 3D metric information from images. For this purpose, despite the different methods and models are used, the bundle adjustment with self calibration is known as calibration method providing accurate, robust and versatile results. In this study, a software developed using Borland C++ Builder programming language and producing semi-automated solutions is described; the used mathematical model, the parameter estimation, and quality analysis of calibration and positioning are given. To test the software, the calibration of the Canon A95 digital camera and the simultaneous calibration of 3 Basler A302fc video cameras were carried out. Calibration results are tested, for both applications, respectively, a relative accuracy in object space of 1/38.000 and 1/20.000 of the size of the object and an accuracy of 1/10 and 1/26 of the pixel spacing in image space are obtained.

Key Words: Self-calibration, software, image measurements, 3d measurements, accuracy.

1. GİRİŞ

Fotogrametrik triangulasyonun doğruluğu, temel olarak CCD kamerasının açısal ölçme çözünürlüğü, kesişen ışınların geometrisi ve ışınların sayısı ve resim ölçeklerinin bir fonksiyonuyla ifade edilmektedir. Açısal ölçme çözünürlüğü ise sırasıyla 2B resim koordinat ölçmesinin doğruluğu, kamera objektifinin odak uzaklığı ve fiziksel görüntüleme işleminin ideal perspektif projeksiyondan olan sapmalarını tanımlayan kalibrasyonun matematik modelinin uygunluğunun bir fonksiyonuyla tanımlanmaktadır (Fraser, vd., 1997).

Kamera kalibrasyonu için perspektif ya da projektif kamera modellerine dayanan birçok farklı algoritma yıllardır kullanılmaktadır. İlk olarak 1970'lerde yakın resim fotogrametrisine giren ve self kalibrasyonlu ışın demetleri ile dengeleme yöntemi olarak bilinen yaklaşımsa bu algoritmalar arasında en popüler yöntem olmuştur. Self kalibrasyonlu demet dengelemesiyle algılayıcı iç ve dış yöneltme elemanları, XYZ cisim nokta koordinatları ve temel kalibrasyon verisi belirlenebilmektedir. Kontrollü test alanlarında self kalibrasyon, CCD kameralı sistemler için geleneksel kalibrasyon yaklaşımları üzerinde neredeyse 10 kata kadar iyileştirmeler sağlamaktadır.

Literatürde, sayısal kameralar için analitik self kalibrasyon yönteminin gözden geçirildiği genel amaçlı araştırmalar yanında (Remondino, vd., 2006; Fryer, 1996; Fraser, vd., 1995; Fraser, 1997) kamera parametrelerin sağlamlığı (Shortis, vd., 1997; Peipe, vd., 2003; Läbe, vd., 2004) ve kalibrasyonun doğruluğunu inceleyen (D'Apuzzo, vd., 1999; Fraser, vd., 2006) birçok çalışma vardır.

Günümüzde self kalibrasyonlu demet dengelemesi yöntemini kullanan farklı amaçlara yönelik ve farklı otomasyon derecelerine sahip ticari fotogrametrik yazılımlar olmasına karşın hem eğitsel bir araç hem de geliştirilebilir yapısıyla akademik araştırmalarda kullanılmak

üzere bir yazılım geliştirilmiştir. Özel bir donanım bileşeni kullanmadan yarı otomatik çözümler üretebilen bu yazılım, yüksek metrik kalite isteklerini de karşılayabilmektedir. Yazılımı test etmek için iki farklı kalibrasyon uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu uygulamalarda, 37 noktalı test alanının 10 noktası self kalibrasyonlu demet dengelemesine bilinmeyen olarak girmiş ve kalibrasyon parametreleriyle birlikte bu noktaların koordinatları da hesaplatılmıştır. Denetleme noktaları (check points) olarak bilinen bu noktaların bilinen ve hesaplanan koordinat değerleri yardımıyla kalibrasyonun ana kalite göstergelerinden olan cisim uzayındaki bağıl doğruluk için 1/38.000 ve 1/20.000 değerleri elde edilmiştir. Yine bu noktaların, referans cisim koordinatlarından kalibrasyon verisi kullanılarak hesaplanan resim koordinatları ve ölçülen resim koordinatları kullanılarak resim uzayında bir pikselin 1/10 ve 1/26'sına varan doğruluklar elde edilmiştir. Her iki uygulamada, yüksek presizyonlu fotogrametrik bir ölçme yazılımı olan Australis'de (Photometrix, 2006) kullanılmış ve kalibrasyon parametreleri ile cisim ve resim uzayındaki doğruluk değerleri için benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Makalenin sonraki bölümlerinde, sayısal kameraların kalibrasyonu için self kalibrasyonlu ışın demetleri ile dengeleme yöntemini kullanan bu yazılım anlatılacak, self kalibrasyonlu demet dengelemesi gözden geçirilecektir. Resim koordinat ölçmeleri, parametre kestirimi ve kalibrasyon ve konum belirlemenin doğruluk ve

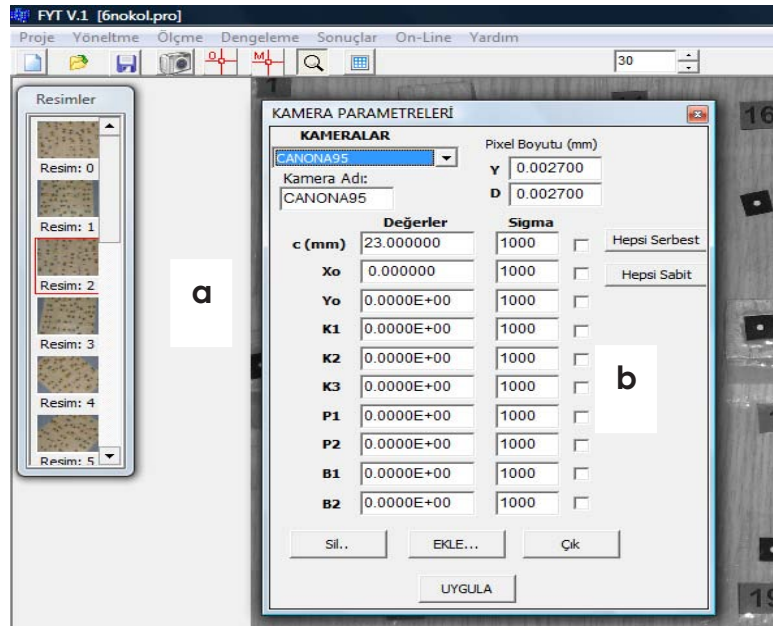
presizyon analizinin yazılım tarafından nasıl gerçekleştirildiği verilecektir. Son bölümdeyse yazılımı test etmek için gerçekleştirilen kalibrasyon uygulamaları ve test sonuçları anlatılacaktır.

2. YAZILIMIN TANITIMI

Borland C++ programlama dili kullanılarak geliştirilen yazılımla kalibrasyon parametrelerinin hesabı; projedeki her bir resim için kamera parametrelerinin tanımlanması, test alanı işaretli hedef noktalarının resim koordinatlarını ölçme ve ışın demetleri ile dengeleme olmak üzere üç işlem adımından oluşur.

a. Kamera Parametrelerinin Tanımlanması

Bu aşama, kısaca ölçülecek her bir resim için kullanılan kamera ve parametrelerinin tanımlanması işlemidir. Şekil 1(a), kalibrasyon projesinde kullanılacak resimleri, Şekil 1(b) de, seçili resim için kameranın piksel boyutları ve iç yöneltme parametreleri, mercek distorsiyon katsayıları ve x ve y resim koordinat eksenleri arasındaki ölçekleme farkından ya da resim koordinat eksenlerinin birbirine dik olmamasından kaynaklanan düzeltme terimlerini içeren kalibrasyon dosyasını göstermektedir. Kamera kalibrasyonunda kullanılacak parametrelerin seçimi kullanıcı tarafından yapılmaktadır. Başlangıçta asal uzaklık için kaba bir kestirim değerinin girilmesi yeterlidir.



Şekil 1. Kalibrasyon projesinde kullanılacak resimler ve kamera dosyasının yazılımda görünümü.

b. Resim Koordinat Ölçmeleri

Tek nokta ölçmelerinde, yazılım, siyah artalan üzerinde beyaz benekler biçiminde bulunan hedef işaretlerinin resim üzerindeki konumlarını, piksel altı doğrulukta yarı otomatik olarak ölçebilmektedir. Yarı otomatik ölçme, hedef işareti üzerinde kaba bir imleç konumlandırmasından sonra yapılan ölçme anlamına gelir. Bu tür hedeflerin resim koordinat ölçmelerinde, önce çapraz korelasyonla görüntü eşleştirme yöntemi kullanılarak hedef işareti görüntüsü merkezinin piksel koordinat sisteminde piksel koordinatları belirlenmekte ve daha sonra merkez belirleme (centroiding) yöntemiyle piksel altı doğrulukta yani bir pikselden daha küçük bir alan içerisindeki piksel altı koordinatları hesaplanmaktadır.

Çapraz korelasyonla görüntü eşleştirmede temel düşünce, aynı olayı tanımlayan iki görüntü penceresindeki gri düzey değerleri arasında hesaplanan korelasyon katsayılarının en büyüğü ile benzerliği bulmaktır. Bu pencerelerden ilki şablon pencere diye adlandırılan referans görüntü, diğeri ise bu şablon pencerenin karşılaştırılacağı arama penceresidir (Kraus, 1997). Korelasyon katsayısı her iki görüntüdeki gri düzey değerler arasındaki kovaryanstan ve görüntülerin gri değerlerinin standart sapmalarından hesaplanmaktadır.

Resim koordinat ölçme işlemine başlamadan önce şablon pencere, herhangi bir resimden elde edilerek yazılıma tanıtılır. Şekil 2, hedef görüntü ve hedef parametreleri girişini göstermektedir.

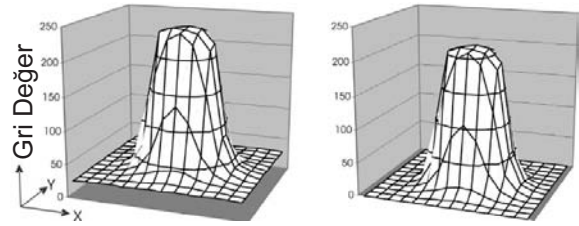


Şekil 2. Yazılımda hedef görüntü parametreleri.

Arama penceresi ise yarı otomatik tek nokta ölçmelerinde hedef işareti üzerindeki kaba imleç konumunu, otomatik ölçmelerdeyse başlangıç dış yöneltme elemanları ve 3B cisim koordinatları kullanılarak kolinearite eşitliklerinden hesaplanan hedef görüntülerinin yaklaşık konumlarını merkez alan ve boyutları kullanıcı tarafından tanımlanan bir pencereyle belirlenir. Şablon pencere arama penceresi üzerinde piksel piksel kaydırılır ve her konumdaki korelasyon katsayısı hesaplanır. Hesaplanan değerlerden en büyüğü için hedef görüntünün piksel koordinatları belirlenir. Sonraki aşama, resim üzerinde hedef görüntünün piksel altı doğrulukta konumunun belirlenmesi için ikinci bir hesap işleminin uygulanmasıdır. Bu hesaplama, ön işlem aşaması ve gerçek merkez hesabı olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilir.

(1) Ön İşlem Aşaması

Ön işlem aşaması, pikselleri hedef bilgisi ya da artalan görüntüsü olarak sınıflandıran bir eşik çıkarma işlemidir. Eşik çıkarma işlemi Şekil 3' de görüleceği gibi hedefin yoğunluk görüntüsünden belirli bir artalan yoğunluğu çıkarılır.



Şekil 3. Artalan eşiklemeden sonra hedef görüntü.

Eşik çıkarma, her sayısal görüntüde artalan görüntüsünün olacağı fikrine dayanır. İstenmeyen artalan aydınlatması, düşük düzeyli elektronik etkiler ve görüntü kayıt ortamından ileri gelen yeniden örnekleme etkileri artalan görüntüsüne neden olur. Dolayısıyla hedef görüntü sinyalini ayırmak için artalan görüntüsünün kaldırılması gerekmektedir (Shortis, vd., 1994).

Global eşik değerleri, özellikle geri yansıtımlı hedefler yada yüksek kontrastlı hedeflerin görüntülerini tanıma işleminin bir parçası olarak da ayarlanabilir. Fakat, hedef konumları için eşik değerleri, hedef görüntüyü çevreleyen sayısal görüntü karesi üzerindeki bir pencere içerisinde lokal olarak belirlenir.

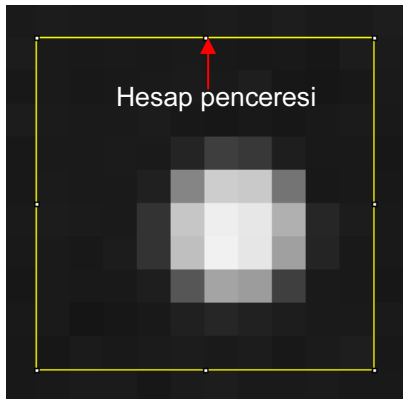
Lokal eşik değerleri birkaç yöntem kullanılarak hesaplanabilir. Pasif hedeflerle de başarılı bir şekilde kullanılan yöntemlerden biri, eşik değerini, penceredeki piksellerin minimum ve

ortalama yoğunluğun ortalaması olarak hesaplanmaktadır. Bu eşik değeri, penceredeki bütün pikselleri hesaba katmaktadır. Piksel yoğunlukları histogramının hesap ve analizi daha doğru bir değer ortaya çıkarmakta, fakat bu durumda hesap yükü büyük ölçüde artmaktadır.

Penceredeki bütün pikselleri göz önünde tutan yöntemlere alternatif bir yaklaşım yalnız pencerenin kenarındaki pikselleri değerlendirmektir. Burada, hesap penceresinin hedef görüntüyü ortaladığı ve dolayısıyla pencere kenar piksellerinin artalan gürültüyü temsil ettiği kabul edilmektedir. Bu yöntemde, hedef görüntünün dış kenarındaki sinyal ve gürültü arasındaki geçiş bölgesi belirsizliğinin eşik değeri hesabı üzerinde hiç bir etkisi olmaz. Tekniğin dezavantajı ise hedef görüntü pencerede merkezlenmediği ve pencere kenarında aykırı pikseller olması durumunda ek hesaplar gerektirmesidir.

Pencere kenar piksellerini kullanan algoritmalar farklı zorluk derecelerine sahiptir. En basit metot, pencere kenarındaki maksimum yoğunluğa genellikle birkaç gri düzey olan keyfi bir sabit eklemektir. Bu teknik bütün artalan gürültüsünün yok edilmesini sağlamaktadır, fakat bu durumda hedef görüntüye ait bazı pikseller de kaybolabilmektedir.

Geliştirilen yazılımda da kullanılan daha karmaşık bir yaklaşım ise kenar piksellerin gri değerlerinin dağılımının istatistiksel analizidir. Bu amaçla ilk olarak yazılımda hedef görüntüsü parametrelerinden girilen hesap penceresi boyutlarında ve korelasyon hesabı kullanılarak elde edilen hedef görüntü merkezinin piksel koordinatlarını ortalayan hesap penceresi görüntüsü geçerli görüntüden çıkarılır (Şekil 4). Şekil 5, bu görüntüye ait piksellerin gri değerlerini göstermektedir.



Şekil 4. Hesap penceresi görüntüsü.

36	35	35	39	37	38	38	35	37	35
37	33	35	38	41	43	39	38	34	34
33	33	38	43	51	53	49	40	36	35
34	34	39	50	70	81	69	50	37	34
34	34	41	60	132	171	127	60	38	35
34	37	43	88	206	237	190	72	40	33
33	35	40	83	189	212	173	62	34	33
34	34	40	50	108	131	86	40	33	34
35	34	34	39	44	45	38	34	34	33
33	35	36	37	36	35	34	35	31	33

Şekil 5. Hesap pencere görüntüsüne ait piksel gri değerleri.

Eşik değeri, hedef parametrelerinde tanımlanan hedef görüntünün minimum gri değeri aralığına bağlı olarak beklenen maksimum yoğunluk değeri için kritik bir değer belirlendikten sonra hesaplanır. İstatistiksel metot, global bir limit ayarlamasını, pencerenin hedef görüntü üzerinde merkezlenmesini ve iteratif bir eşik değeri hesabını gerektirir. Bu önlemler olmadan, örneğin pencere kenarına giren başka bir hedef görüntünün etkisi altında yanlış eşik değerleri hesaplanabilmektedir.

Şekil 6, eşikleme işlemi sonrasında elde edilen hedef görüntüye ait gri değerleri göstermektedir.

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
0	0	0	2	10	12	8	0	0	0
0	0	0	9	29	40	28	9	0	0
0	0	0	19	91	130	86	19	0	0
0	0	2	47	165	196	149	31	0	0
0	0	0	42	148	171	132	21	0	0
0	0	0	9	67	90	45	0	0	0
0	0	0	0	3	4	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Şekil 6. Eşikleme işlemi sonrası hedef görüntünün gri değerleri.

(2) Hedef Görüntünün Ana Görüntü Bölgesinin Test Edilmesi

Yüksek kontrastlı hedefler için eşik değeri belirleme algoritmalarının hepsi, aykırı pikseller riskini göze almalıdır. Eşik değerden büyük yoğunluk değerlerine sahip olan böyle pikseller, hedef görüntünün ana görüntü bölgesine ait bir parça değildir. Konu dışı artalan detaylar ya da

diğer hedef görüntülerin geçerli pencereye girmesi aykırı piksellere neden olur. Aykırı piksellerin kaldırılması, pencere merkezinin en azından yaklaşık olarak bilinen hedef görüntü üzerinde merkezleştirilmesi düşüncesine dayanır. İlk konum çapraz korelasyonla hesaplanmıştır. Aykırılığın kaldırılması işlemi hedef ana görüntü bölgesinin kenarlarının belirlenmesiyle kontrol edilmektedir. Kenar belirleme kriteri, eşik değer altındaki piksel yoğunluğunun ilk değeridir. Pencere boyutunun yeterince büyük olduğu varsayımı altında pikseller hedef görüntü merkezinden dışa doğru taranarak hedef görüntü kenarı belirlenir. Görüntü kenarı belirlenince, pencere kenarına doğru karşılaşılan bütün sonraki gelen pikseller hedefin ana görüntüsüne ait olmayan pikseller olarak düşünülür ve yoğunlukları sıfıra ayarlanır. Aykırılık için tarama, görüntü tarama satırları boyunca ve karşısında olmak üzere iki dik doğrultuda yerine getirilmektedir.

(3) Geometrik test

Yazılımda, hedef işareti görüntüsünün şeklini onaylamak ya da doğrulamak için bir takım geometrik testler yapılır. Bunlardan ilki, minimum değer altında, maksimum değer üstündeki hedef işareti görüntülerini ret eden boyut aralığı kriteridir (Şekil 2). İkinci test kriteri olarak ise, doğrultulardan biri için tarama satır eksenini kullanan iki dik doğrultudaki uzunlukların oranı kullanılmıştır.

(4) Piksel-altı Doğrulukta Konum Belirleme

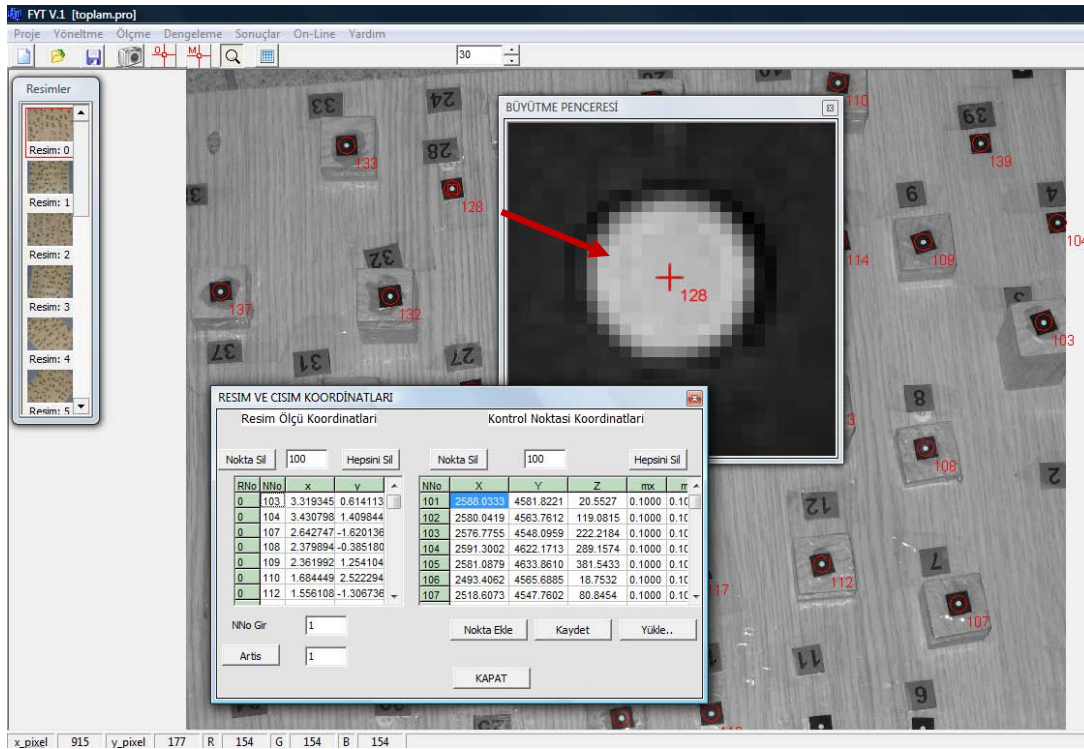
Hedef görüntünün resim üzerindeki konumunu piksel altı doğrulukta belirleyebilmek için farklı yöntemler kullanılabilir. Fakat yoğunluk ağırlıklı merkez belirleme metodu basit, hızlı ve doğru bir hesap yöntemi olması nedeniyle endüstriyel fotogrametri uygulamalarında en çok kullanılan yaklaşım olmuştur. Geliştirilen yazılımda da kullanılan bu yöntemde x_0 , y_0 piksel altı ağırlık merkezi koordinatları;

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m g_{ij} \begin{bmatrix} x_{ij} \\ y_{ij} \end{bmatrix}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m g_{ij}} \quad (1)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır. Burada, x_{ij} ve y_{ij} hedef şeklin içerisindeki piksellerin satır ve sütun koordinatlarını, g_{ij} 'de karşılık gelen gri değeri göstermektedir (Otepka, vd., 2002). Yüksek kontrastlı görüntülerde bu teknik kullanılarak, piksel boyutunun %2'sine varan bir ölçü doğruluğuna ulaşılabilmektedir (Fraser, 1997).

Hedef görüntünün resim üzerindeki konumu piksel altı doğrulukta belirlendikten sonra son işlem aşaması, her bir hedef görüntüsünün geçerli görüntü üzerindeki piksel altı konumunun resim koordinat sistemine dönüştürülerek resim koordinat dosyasına kayıt edilmesidir.

Geliştirilen yazılımla gerçekleştirilecek kalibrasyon uygulamalarında her bir resimdeki tüm işaretli noktaların koordinat ölçmeleri, üç işlem adımıyla gerçekleştirilir. İlk olarak cisim koordinatları bilinen en az 6 noktanın resim koordinatları her bir resimde yarı otomatik olarak ölçülür. 2. adımda Doğrudan Doğrusal Dönüşüm (Direkt lineer Transformasyon) yöntemi kullanılarak direkt çözüm yöntemiyle, sonrada kolinearite model kullanılarak iteratif bir çözümle başlangıç dış yöneltme değerleri (konum X^0 , Y^0 , Z^0 ve dönüklük ω , φ , κ) hesaplanır. Son olarak, geriye kalan hedef noktaları, başlangıç dış yöneltme elemanları ve 3B cisim koordinatları kullanılarak kolinearite eşitliklerinden hesaplanan yaklaşık görüntü konumlarında otomatik olarak ölçülür. Şekil 7, bir resimdeki ölçme işlemi sonrası elde edilen yazılım görüntüsünü göstermektedir.



Şekil 7. Test alanı hedef işaretlerinin resim koordinatlarını ölçme işlemi sonrası yazılım görüntüsü.

c. Demet Dengelemesi

Self kalibrasyonlu demet dengelemesinin matematik modeli, genişletilmiş kolinearite eşitliklerine dayanır.

$$x - x_0 + \Delta x = -c \frac{R_1}{R_3}$$

$$y - y_0 + \Delta y = -c \frac{R_2}{R_3}$$

ile,

$$\begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X - X^0 \\ Y - Y^0 \\ Z - Z^0 \end{bmatrix}$$

Burada,

x, y :Noktanın resim koordinatlarını,
 x_0, y_0, c :İzdüşümü merkezinin resim koordinat sistemindeki konumunu gösteren iç yönelme parametrelerini,
 X, Y, Z :Noktanın cisim koordinatlarını,

X^0, Y^0, Z^0 :İzdüşümü merkezinin cisim koordinatlarını,

R :Kameranın üç dönme açısıyla (ω, ϕ, κ) hesaplanan ortogonal dönme matrisini,

$\Delta x, \Delta y$:Resim koordinatları için düzeltme terimlerini gösterir.

Ek parametrelerin bir setinin fonksiyonları olan resim koordinat düzeltme terimleri, doğada fiziksel olan kolinearite koşulunun ideal geometrisinden olan sapmaları modeller. Bu sapmalarının 4 ana kaynağı vardır. Bunlar sistematik radyal distorsiyon, teğetsel distorsiyon, görüntü düzleminin düz olmaması ve düzlemdeki görüntü distorsiyonudur. Herhangi bir görüntü noktasının teorik konumundan olan ötelenme bu kaynakların her birinin etkisinin toplamı kadar olur (Fraser, vd., 1995, Habib vd., 2003).

Geliştirilen yazılımda, iç yönelme elemanları (x_0, y_0, c), mercek distorsiyon katsayıları (k_1, k_2, k_3 ve p_1, p_2), resim koordinat eksenleri arasındaki ölçekleme farkı ve resim koordinat eksenlerinin birbirine dik olmamasından kaynaklanan düzeltme terimlerini içeren (b_1, b_2) standart 10 terimli fiziksel kalibrasyon modeli kullanılmıştır. (Fraser, 1997). Bu model,

$$\Delta x = -x_0 - \frac{x}{c} \Delta c + \bar{x} r^2 k_1 + \bar{x} r^4 k_2 + \bar{x} r^6 k_3 \\ + (r^2 + 2\bar{x}^2) p_1 + 2p_2 \bar{x} \bar{y} + b_1 \bar{x} + b_2 \bar{y}$$

$$\Delta y = -y_0 - \frac{y}{c} \Delta c + \bar{y} r^2 k_1 + \bar{y} r^4 k_2 \\ + \bar{y} r^6 k_3 + 2p_1 \bar{x} \bar{y} + (r^2 + 2\bar{y}^2) p_2$$

(3)

ile,

$$r = \sqrt{\frac{-2}{x^2 + y^2}} ; \bar{x} = x - x_0 ; \bar{y} = y - y_0$$

eşitlikleri ile ifade edilmektedir.

Demet dengelemesinde, resim üzerinde ölçülen her bir nokta için iki kolinearite eşitliği yazılır. Cisim noktalarının karşılıklı bütün resim noktaları için yazılan eşitliklerin toplamı, bilinmeyen parametrelerin belirlenmesini mümkün kılan bir denklem sistemiyle sonuçlanır. Eşitlikler bilinmeyenlere göre lineer olmayan bir denklem sistemidir ve en küçük kareler yöntemiyle çözüm için 1. Derece Taylor serisi kullanılarak lineer hale getirilmektedir. Kontrol noktalarının ölçülen cisim koordinatları ve ek parametreler de gözlem denklemleri formunda modele dâhil edilir. Ek parametrelerin sayısı ve seçimi, standart sapmaları kontrol edilerek uygulamanın gereksinimlerine bağlı olarak değiştirilebilmektedir. Gözlem denklemleri sistemi Gauss-Markov modelinde aşağıdaki gibi formüle edilir:

$$-e = Ax - l \quad (4)$$

$$P = \sigma_0^2 \Sigma^{-1}$$

ile,

$$x^T = [\Delta X, \Delta Y, \Delta Z, \Delta X_0, \Delta Y_0, \Delta Z_0, \Delta \omega, \Delta \varphi, \Delta \kappa, \Delta AP_1 \dots]$$

Burada,

- e :Gözlem hataları vektörünü,
- A :Katsayılar matrisini,
- x :Bilinmeyen parametreler vektörünü,
- l :Gözlem vektörünü,
- P :Ağırlık matrisini,
- $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$:Bir noktanın cisim koordinatlarının yaklaşık değerlerine getirilecek

düzeltmeleri,

$\Delta X_0, \dots, \Delta \kappa$: Dış yöneltme elemanlarının yaklaşık değerlerine getirilecek düzeltmeleri,

AP_i :Ek parametreleri,

σ_0^2 :Öncül varyans faktörü,

Σ :Gözlemlerin varyans-kovaryans matrisini gösterir.

Katsayılar matrisi (A), eşitlik 3'ün bilinmeyenlere göre kısmi türevlerini içerir. Parametrelerin kestirimi en küçük kareler çözümüyle verilir.

$$\hat{x} = (A^T P A)^{-1} A^T P l \quad (5)$$

Lineer olmayan demet dengelemesi problemi lineer problemlerin bir dizisi olarak çözülür. Her iterasyonda bir düzeltme vektörü kestirilir ve bu değerler yaklaşık değerlere eklenerek parametreler güncellenir (Mikhail, vd., 2001; Wolf, vd., 2000). Gözlemlerin düzeltmeleri ve soncul varyans faktörü aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanır.

$$v = A \hat{x} - l$$

$$\sigma_0^2 = \frac{v^T P V}{r}; \quad r = n - u \quad (6)$$

Burada, r serbestlik derecesini, n gözlem denklemlerinin sayısını ve u da bilinmeyenlerin sayısını göstermektedir.

Yazılımda iterasyonu durdurma kriteri olarak, ardışık iterasyonlar arasında birim ağırlıklı ölçünün ortalama hata değerleri (σ_0) arasındaki fark için girilen bir sınır değer kullanılmıştır. Bu sınır değerle birlikte maksimum iterasyon sayısı, resim koordinatlarını ölçme presizyonu ve kaba hata ölçü testinde kullanılacak yöntemin belirlenmesinden oluşan dengeleme kontrol elemanları dengeleme öncesi demet dengelemesi diyalog penceresinde tanımlanır (Şekil 8). Dengeleme sonrası sonuçları, yine bu diyalog penceresi üzerinde özet olarak gösterilirken dengeleme sonuçlarının ayrıntılı gösterimi bir metin dosyası biçiminde bilgisayarın proje klasörü içine yazdırılır.

Şekil 8. Demet dengemesi kontrol elemanları.

ç. Doğruluk Kriteri

Kalibrasyon ve konum belirlemenin performansı, prezisyon ve doğruluk ölçütleriyle değerlendirilir. Prezisyon, en küçük kareler dengesiyle kestirilen parametrelerin istatistikî değişkenliğini tanımlamaktadır. Kestirilen parametrelerin standart sapmaları, varyans faktörü ve normal denklem matrisinin tersiyle hesaplanmaktadır. Örneğin cisim nokta koordinatlarının standart sapmaları,

$$\begin{aligned}\hat{\sigma}_{X_i} &= \hat{\sigma}_0 \sqrt{Q_{X_i X_i}} \\ \hat{\sigma}_{Y_i} &= \hat{\sigma}_0 \sqrt{Q_{Y_i Y_i}} \\ \hat{\sigma}_{Z_i} &= \hat{\sigma}_0 \sqrt{Q_{Z_i Z_i}}\end{aligned}\quad (7)$$

eşitlikleri ile hesaplanmaktadır. Burada, $Q_{X_i X_i}, \dots$, normal denklem matrisinin tersinin bilinmeyen parametre konumundaki köşegen elemanını göstermektedir. Kalibrasyon ve konum belirlemenin sonuçlarını analiz etmek için kullanılan cisim nokta koordinatlarının ortalama prezisyonu ise aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\begin{aligned}\hat{\sigma}_X &= \sqrt{\frac{\sum \hat{\sigma}_{X_i}^2}{n_X}} \\ \hat{\sigma}_Y &= \sqrt{\frac{\sum \hat{\sigma}_{Y_i}^2}{n_Y}} \\ \hat{\sigma}_Z &= \sqrt{\frac{\sum \hat{\sigma}_{Z_i}^2}{n_Z}}\end{aligned}\quad (8)$$

Burada, n_X, n_Y ve n_Z , cisim nokta koordinatlarının sayısını göstermektedir (Beyer, 1992).

Doğruluk, kestirilen parametrelerin gerçek değerlere ne kadar yakın olduğunu belirlemektedir. Deneysel bir ölçüt hassas referans değerlerle karşılaştırılarak elde edilir.

$$\begin{aligned}\mu_X &= \sqrt{\frac{\sum (X_i^r - X_i)^2}{n_{rX}}} \\ \mu_Y &= \sqrt{\frac{\sum (Y_i^r - Y_i)^2}{n_{rY}}} \\ \mu_Z &= \sqrt{\frac{\sum (Z_i^r - Z_i)^2}{n_{rZ}}}\end{aligned}\quad (9)$$

Burada X^r, Y^r ve Z^r denetleme noktalarının yani koordinatları bilinen fakat dengelemeye bilinmeyen olarak giren noktaların referans koordinatlarını, n_{rX}, n_{rY} ve n_{rZ} 'lerde denetleme nokta koordinatlarının sayısını göstermektedir (Beyer, 1992). Bu karşılaştırma, kestirilen cisim nokta koordinatlarıyla referans koordinatlarının kolinearite eşitlikleri yardımıyla resim düzlemine projekte edilmesiyle resim uzayında da gerçekleştirilir.

$$\mu_x = \sqrt{\frac{\sum(x_i^r - x_i)^2}{n_{rx}}} \quad (10)$$

$$\mu_y = \sqrt{\frac{\sum(y_i^r - y_i)^2}{n_{ry}}}$$

Burada,

x_i, y_i :Dengelenmiş resim koordinatlarını,
 x_i^r, y_i^r :Referans koordinatlardan hesaplanan resim koordinatlarını,
 n_{rx} :Nokta sayısını gösterir.

Bağıl doğruluk, deneysel doğruluk ölçütlerinin (μ_x, μ_y, μ_z) ilgili koordinat doğrultularındaki cisim boyutuna bölünerek elde edilir. Soncul varyans faktörü ve resim koordinat düzeltmelerinin karesel ortalama hatası prezisyonun göstergeleri olarak geniş ölçüde kullanılır. Bağıl doğruluk ve resim uzayındaki deneysel doğruluk ölçütleri ise cisim boyutlarından ve görüntüleme ölçeğinden büyük ölçüde bağımsız olduğu için üniversal ölçütlerdir (Beyer, 1992).

d. Kaba Hata Testi

Yanlış ölçüler tamamıyla yanlış sonuçlara neden olur ve hatta dengelemenin yakınsamasını da engelleyebilir. Dolayısıyla en küçük kareler dengelemesi, sağlam bir kestirim tekniği olarak düşünülmez. Bu nedenle, dengelenmiş değerler vektörü (X) ya da düzeltmeler (v) üzerinde bir hata test yöntemi kullanılarak resim koordinat ölçmelerinde olabilecek kaba hatalar kontrol edilmelidir. İki vektör için beklenen değerlerin test edilmesi gerekir. Çözüm vektörü için beklenen değer genellikle bilinmediği için düzeltme vektörü kullanılır.

Ölçmelerdeki kaba hataları belirlemek için genel yaklaşım güvenilirlik teorisine ya da Barda (1968) tarafından geliştirilen data-snooping yöntemine dayanır. Data snooping yöntemi fotogrametride ilk olarak bağımsız modellerle dengelemede ve daha sonra Grünen (1978a) ve Torlergard (1981) tarafından demet dengelemesi için kullanılmıştır.

Ölçmelerin normal dağılımda oldukları sıfır hipotezi altında, her bir i ölçmesi için w_i katsayısı,

$$w_i = \frac{-v_i}{\sigma_0 \sqrt{q_{v_i v_i}}} = \left| \frac{-v_i}{q_{v_i}} \right| < N_{1-\alpha/2} \quad (11)$$

eşitliği ile hesaplanır. B katsayılar matrisi olmak üzere, Q_{vv} matrisinin i 'ci elemanı,

$$Q_{vv} = W_{ll}^{-1} - B(B^T W_{ll} B)^{-1} B^T \quad (12)$$

eşitliğiyle hesaplanır.

Kaba hata yakalama tekniği güvenilir bir teorik formülasyona sahip olmakla birlikte eğer gerçekleştirilmezse başarısız sonuçlara yol açabilecek bazı varsayımlara dayanır. Bu varsayımlar,

- Ölçmelerde yalnız bir kaba hata bulunur ya da birden çok kaba hata olması durumunda birbirlerini etkilemezler.
- Öncül varyans faktörü bilinen bir değerdir.

Bu kabuller fotogrametride nadiren karşılanır. Bu nedenle daha pratik bir formülasyon Pope (1975) tarafından önerilmiştir.

$$w_i = \frac{-v_i}{\hat{\sigma}_0 \sqrt{\hat{q}_{v_i v_i}}} = \left| \frac{-v_i}{\hat{q}_{v_i}} \right| < \tau_{r, 1-\alpha/2} \quad (13)$$

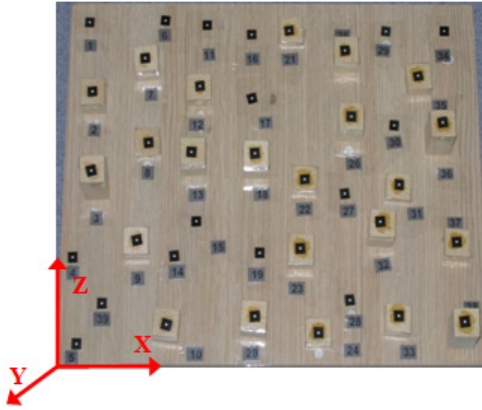
Eğer sıfır hipotezi $E(v)=0$ doğruysa, w_i 'nin τ -dağılımında olduğu kabul edilir. Sistemde fazla ölçü sayısı (r) yeterince büyük olursa τ dağılımı yerine t dağılımı da kullanılabilir (Remondino, 2006).

Geliştirilen yazılımda da kaba ölçü testi için Pope yöntemi kullanılmıştır. Her bir resim koordinat ölçmesine ait w_i katsayıları hesaplanarak test büyüklüğüyle ($\tau_{r, 1-\alpha/2}$) karşılaştırılır. Test büyüklüğünden daha büyük w_i katsayıları varsa bu değerlerden en büyük olanda dolayısıyla istatistiksel anlamda en büyük düzeltmeye sahip resim koordinat ölçüsünde kaba ölçü hatası olduğu kabul edilir ve söz konusu ölçü atılarak dengeleme tekrarlanır. Bu işlem kaba hatalı ölçü kalmayınca kadar devam eder.

3. UYGULAMA

Geliştirilen yazılımın test edilmesi amacıyla iki farklı kalibrasyon uygulaması gerçekleştirilmiştir. İlk uygulamada, Canon A95 kompakt sayısal resim çekme makinesinin maksimum zoom'da kalibrasyonu yapılırken, ikinci uygulamada sabit odak uzaklıklı 3 adet Basler a302 fc video kamerasının eş zamanlı kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir.

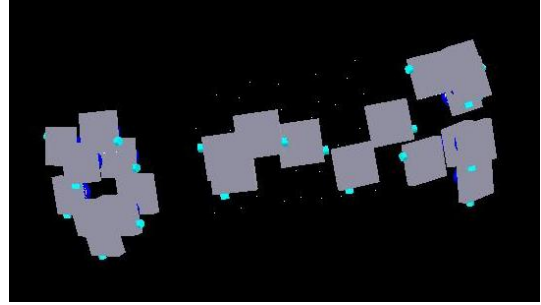
Kalibrasyon için her iki uygulamada da üç boyutlu koordinatları daha önceden ölçülmüş, siyah arka plan üzerinde beyaz benekler biçiminde 37 noktalı bir test alanı kullanılmıştır (Şekil 9). Noktaların hedef işaretleri cisim uzayında yaklaşık 3 mm.lik bir çapa sahiptir. Test alanı, yaklaşık olarak X Koordinat doğrultusunda (yatay) 45 cm, Y koordinat doğrultusunda (dikey) 36 cm boyutlarındadır. Test alanının ön taraftaki hedef noktalarıysa test alanı yatay düzleminden en fazla 6 cm mesafededir.



Şekil 9. Kullanılan Test Alanı

a. Canon A95 Sayısal Resim Çekme Makinasının Kalibrasyonu

5 MP çözünürlüğe (2592x1944 piksel) sahip canon A95 kompakt sayısal resim çekme makinesinin bir pikselinin boyutu 2,7 μm 'dur. Kalibrasyon uygulaması için test alanının, yaklaşık 1,4 m'lik mesafeden, maksimum zoom'da 17 resmi çekilmiştir. Resimlerden dördünün ± 90 derecelik yatış açısı (roll angle) ile çekildiği resim çekim geometrisi ve test alanı noktaları şekil 10'da gösterilmiştir.



Şekil 10. Resim çekim geometrisi

Görüntü üzerinde yaklaşık 18 piksellik bir çapa sahip hedef işaretlerinin resim koordinat ölçmeleri, her bir görüntüde merkez belirleme (centroiding) yöntemiyle 6 hedef işareti için yarı otomatik ve sonra geriye kalan hedef işaretleri için tam otomatik olarak gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon ve konum belirlemenin doğruluğunu test etmek için test alanının 10 noktasının (check points) üç boyutlu koordinatları self kalibrasyon demet dengelemesine bilinmeyen olarak girmiş ve tekrar hesaplatılmıştır. Self kalibrasyon demet dengelemesi sonuçları Tablo 1 ve Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Geliştirilen yazılımla hesaplanan kalibrasyon parametreleri.

c	x_0	y_0	k_1	k_2	k_3	p_1	p_2	b_1	b_2
21.1762	-0.0180	0.0496	2.39E-04	1.88E-06	-2.54E-08	-1.66E-06	9.26E-07	4.63E-05	2.42E-04

Tablo 2. Self-kalibrasyon demet dengelemesi sonuçları.

r.s.	s.d.	σ	μ_x [mm]	μ_y [mm]	μ_z [mm]	$\hat{\sigma}_x$ [mm]	$\hat{\sigma}_y$ [mm]	$\hat{\sigma}_z$ [mm]	$\hat{\mu}_x$ [μm]	$\hat{\mu}_y$ [μm]	μ_x [μm]	μ_y [μm]
17	747	0.099	0.012	0.022	0.008	0.005	0.009	0.004	0.14	0.11	0.27	0.25

Burada,

r.s. :Resim sayısını,

s.d. :Serbestlik derecesini,

σ :Varyans faktörünü,

μ_x, μ_y, μ_z :Denetleme nokta koordinatlarının deneysel doğruluğunu,

$\hat{\mu}_x, \hat{\mu}_y, \hat{\mu}_z$:Cisim nokta koordinatlarının ortalama prezisyonunu,

$\hat{\mu}_x, \hat{\mu}_y$:Resim koordinat düzeltmelerinin karesel ortalama hatasını

μ_x, μ_y :Resim uzayındaki doğruluğu gösterir.

Tablo 3. Australis yazılımıyla hesaplanan kalibrasyon parametreleri.

c	x ₀	y ₀	k ₁	k ₂	k ₃	p ₁	p ₂	b ₁	b ₂
21.1773	-0.0098	0.0529	2.23e-004	2.83E-06	-2.92E-08	-5.95E-06	5.92E-08	7.76E-05	2.46E-04

Tablo 4. Self-kalibrasyon demet dengelemesi sonuçları.

r.s.	s.d.	σ	μ_X [mm]	μ_Y [mm]	μ_Z [mm]	$\hat{\sigma}_X$ [mm]	$\hat{\sigma}_Y$ [mm]	$\hat{\sigma}_Z$ [mm]	$\hat{\mu}_x$ [μm]	$\hat{\mu}_y$ [μm]	μ_x [μm]	μ_y [μm]
17	759	0.092	0.010	0.016	0.008	0.003	0.007	0.003	0.12	0.10	0.25	0.23

Dengeleme sonunda, denetleme noktalarının bilinen ve hesaplanan koordinat değerleri arasındaki farklar kullanılarak sistemin üç boyutlu ölçme doğruluğu 0.015 mm olarak hesaplanmıştır. Bu değer, cisim boyutunun 1/38.000'ne karşılık gelir. Resim koordinat ölçme doğruluğunu belirlemek amacıyla denetleme noktaları, hesaplanan iç yönlendirme elemanları kullanılarak resim düzlemi üzerine projekte edilmiş ve ölçülen resim koordinatlarıyla projekte edilen noktalar arasındaki farklardan bütün resimler için toplam standart sapma, $\sigma_{xy}=0.26 \mu\text{m}$ ya da 0.1 piksel olarak hesaplanmıştır.

Sayısal resim çekme makinesinin kalibrasyonu, geliştirilen yazılımla aynı matematik model ve distorsiyon eşitliklerini kullanan Australis yazılımıyla da gerçekleştirilmiş ve hesaplanan kalibrasyon parametreleri karşılaştırılmıştır. Australis yazılımıyla gerçekleştirilen hesaplamalarda, hem geliştirilen yazılımla yapılan resim koordinat ölçmeleri (Durum 1), hem de Australis yazılımının kendi resim koordinat ölçme değerleri (Durum 2) kullanılmıştır. Durum 2'ye ait self kalibrasyon dengelemesi sonuçları Tablo3 ve Tablo 4'de gösterilmiştir.

Geliştirilen yazılımla yapılan ve kaba hatalı ölçü içermeyen resim koordinat ölçmelerinin Australis yazılımında kullanılması durumunda (Durum 1), kalibrasyon parametreleri için aynı değerler hesaplanmıştır. Australis yazılımının kendi resim koordinat ölçme değerlerini kullanması durumunda ise (Durum 2) her iki yazılımla hesaplanan kalibrasyon parametreleri arasında çok küçük farklar oluşmaktadır. Bu farklar her iki yazılımın resim koordinat ölçme ve ölçülerdeki kaba hataları belirlemedeki yöntem farklılıklarından kaynaklanmaktadır. Australis yazılımıyla cisim uzayındaki bağıl doğruluk için cisim boyutunun 1/48.000'i ve resim uzayındaki

doğruluk içinde $\sigma_{xy}=0.24 \mu\text{m}$ ya da 0.1 piksel değerleri hesaplanmıştır.

b. Basler A 302fc Video Kameralarının Kalibrasyonu

Kalibrasyon uygulaması için, tripod üzerine monte edilen alüminyum bir parça üzerinde farklı konumlara yerleştirilmiş üç adet alan taramalı Basler A302fs kamerası kullanılmıştır (Şekil 11). Maksimum 780x582 piksel çözünürlüğe sahip olan kameraların bir pikselinin boyutu 8.3 μm dir. Kenarlardaki kameralarda 16 mm sabit odak uzaklıklı mercek, ortada bulunan üçüncü kamerada ise minimumu 12.5 mm ve maksimumu 70 mm olmak üzere değişken odak uzaklıklı mercek kullanılmıştır.



Şekil 11. 3 video kameralı sistem.

Kalibrasyon uygulamasında test alanının üçlü görüntüler biçiminde yaklaşık 1.375 m lik mesafeden alınan toplam 9 görüntüsü kullanılmıştır. Hedef işaretleri, resim uzayında yaklaşık 6 piksellik çapa sahiptir. Kalibrasyon ve konum belirlemenin doğruluğunu test etmek için yine test alanının aynı 10 noktasının (check points) üç boyutlu koordinatları self kalibrasyon demet dengelemesine bilinmeyen olarak girmiş ve tekrar hesaplatılmıştır. Self kalibrasyon demet dengelemesi sonuçları Tablo 5 ve Tablo 6'da gösterilmiştir.

Tablo 5. Geliştirilen yazılımla hesaplanan kalibrasyon parametreleri.

c	x ₀	y ₀	k ₁	k ₂	k ₃	p ₁	p ₂	b ₁	b ₂
16.3453	0.0221	0.0367	4.31E-04	6.32E-06	-6.31E-08	2.37E-05	1.81E-05	-5.51E-05	3.83E-04
13.0781	0.0333	0.3399	5.96E-04	8.11E-06	-1.53E-06	8.74E-05	1.30E-04	-5.10E-06	2.49E-04
16.3742	0.1740	0.0033	4.89E-04	6.15E-06	-1.29E-07	-9.66E-06	3.30E-05	3.57E-04	2.63E-04

Tablo 6. Self-kalibrasyon demet dengelemesi sonuçları.

r.s.	s.d.	σ	μ_x [mm]	μ_y [mm]	μ_z [mm]	$\hat{\sigma}_x$ [mm]	$\hat{\sigma}_y$ [mm]	$\hat{\sigma}_z$ [mm]	$\hat{\mu}_x$ [μm]	$\hat{\mu}_y$ [μm]	μ_x [μm]	μ_y [μm]
9	394	0.178	0.019	0.039	0.029	0.012	0.028	0.012	0.16	0.19	0.25	0.37

Tablo 7. Australis yazılımıyla hesaplanan kalibrasyon parametreleri.

c	x ₀	y ₀	k ₁	k ₂	k ₃	p ₁	p ₂	b ₁	b ₂
16.3477	0.0359	0.0325	4.31E-04	1.07E-05	-3.45E-07	-3.49E-05	8.94E-06	-4.77E-05	3.76E-04
13.0958	0.0165	0.3610	7.12E-04	-1.78E-05	-1.94E-07	1.03E-04	8.77E-05	2.73E-05	3.72E-04
16.3838	0.1793	-0.0132	4.71E-04	1.15E-05	-3.52E-07	-4.16E-06	2.97E-06	3.55E-05	2.85E-04

Tablo 8. Self-kalibrasyon demet dengelemesi sonuçları.

r.s.	s.d.	σ	μ_x [mm]	μ_y [mm]	μ_z [mm]	$\hat{\sigma}_x$ [mm]	$\hat{\sigma}_y$ [mm]	$\hat{\sigma}_z$ [mm]	$\hat{\mu}_x$ [μm]	$\hat{\mu}_y$ [μm]	μ_x [μm]	μ_y [μm]
9	392	0.296	0.019	0.041	0.024	0.014	0.043	0.014	0.34	0.33	0.42	0.47

Dengeleme sonunda, referans nokta koordinatları kullanılarak sistemin cisim uzayındaki bağıl doğruluğu için cisim boyutunun 1/20.000'i ve resim uzayındaki doğruluk içinde 0.32 μm ya da 0.04 piksel değerleri hesaplanmıştır.

Video kameraların eşzamanlı kalibrasyonu, Australis yazılımıyla da gerçekleştirilmiş ve hesaplanan kalibrasyon parametreleri karşılaştırılmıştır. Australis yazılımının kendi resim koordinat ölçme değerlerini kullanması durumu için self kalibrasyon dengelemesi sonuçları Tablo7 ve Tablo 8'de gösterilmiştir.

İlk uygulamada olduğu gibi, aynı resim koordinat ölçmelerinin kullanılması durumunda her iki yazılımda, kalibrasyon parametreleri için aynı değerleri üretirken Australis yazılımının kendi resim koordinat ölçme değerlerini kullanması durumunda iki yazılımla hesaplanan kalibrasyon parametreleri arasında yine küçük farklar oluşmaktadır. Australis yazılımıyla cisim uzayındaki bağıl doğruluk için cisim boyutunun 1/20.000'i ve resim uzayındaki doğruluk içinde $\sigma_{xy}=0.45 \mu m$ ya da 0.05 piksel değerleri hesaplanmıştır

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, self kalibrasyonlu demet dengelemesi yöntemiyle kamera kalibrasyonu için Borland C++ Builder programlama dili kullanılarak geliştirilen bir yazılım anlatılmıştır. Geliştirilen yazılımı test etmek için iki farklı kalibrasyon uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu uygulamalarda, denetleme noktalarının bilinen ve hesaplanan koordinat değerleri arasındaki farklar kullanılarak kalibrasyonun ana kalite göstergeleri olan cisim uzayındaki bağıl doğruluk için cisim boyutunun 1/38.000 ve 1/20.000'i ve resim uzayındaki doğruluk içinde bir pikselin 1/10 ve 1/26'sı hesaplanmıştır.

Her iki uygulamada, yüksek doğruluklu endüstriyel ve mühendislik ölçmeleri için geliştirilmiş ticari bir fotogrametrik ölçme yazılımı olan Australis (Photometrix, 2006) de kullanılmış ve bu yazılımla, cisim ve resim uzayındaki doğruluk değerleri için geliştirilen yazılımla benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Son kullanıcı açısından doğruluk yanında yazılımdan beklenen ikinci bir kriterde yazılımın otomasyon derecesidir. Piyasada, her bir işaret noktası için resim koordinat ölçmelerinin elle yada yarı otomatik olarak yapıldığı yazılımlardan

kodlanmış hedef işaretleri gibi özel donanım bileşenleri kullanarak kamera yöneltme ve kalibrasyon parametrelerini tam otomatik belirleyebilen yazılımlara kadar farklı otomasyon derecelerine sahip yazılımlar kullanılmaktadır. Geliştirilen yazılımdaysa özel bir donanım bileşeni kullanmadan yarı otomatik çözümler sağlanmıştır. Burada yarı otomatik çözüm, uygun hedef işaretleri kullanılması durumunda bu hedef işaretlerinin yarı otomatik ve tam otomatik olarak ölçülmesi ve sonrasında tek butonla kamera yöneltme ve kalibrasyon parametrelerinin hesaplanması anlamına gelir.

Yapılan uygulamalarda, düşük maliyetli kompakt sayısal resim çekme makinesi, düşük çözünürlüklü endüstriyel video kameralar ve kâğıttan yapılmış hedef işaretleri kullanılmıştır. Yüksek çözünürlüklü video kamera ya da resim çekme makinesi ve geri yansıtılmalı hedefler gibi daha uygun hedef işaretleri kullanılması durumunda sistemin ölçme doğruluğunun daha da artacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Beyer, H. A., 1992, **Accurate calibration of CCD cameras**, *Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR '92*, pp. 97-101, Champaign, USA.
- Brown, D.C., 1971, **Close-range camera calibration**. *PE&RS*, Vol. 37(8), pp.855-866
- D'Apuzzo, N. and Maas, H.-G., 1999, **On the suitability of digital camcorders for virtual reality image data capture**. *Proceedings of SPIE Videometrics VI*, El-Hakim and Gruen (Eds.), Vol. 3461, pp. 259-267
- Habib, A. and Morgan, M., 2003, **Automatic calibration of low-cost digital cameras**, *Journal of Optical Engineering*, 42(4), 948-955.
- Fraser, C.S. and Al-Ajlouni, S., 2006, **Zoom-dependent camera calibration in digital close-range photogrammetry**. *PE&RS*, (in press)
- Fraser, C. S., 1997, **Digital camera self-calibration**, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 52, No. 4, pp.149-159.
- Fraser, C. S., Shortis, M. R. and Ganci, G., 1995, **Multi-sensor system self-calibration**, *In Video-metrics IV*, pages 2–18. SPIE.
- Fryer, J., 1996, **Camera Calibration in Close-range Photogrammetry and Machine Vision**, Atkinson (Ed.), Whittles Publishing, UK, pp.156-179
- Kraus, K., 1997, **Photogrammetry**, vols 1, Bonn, Dümmler, ISBN 3-427-78686-6, 78653-6.
- Läbe, T. And Förstner, W., 2004, **Geometric stability of lowcost digital consumer cameras**. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 35(5), pp 528-535, Istanbul, Turkey
- Mikhail, E., Bethel, J. and M. J.C., 2001, **Introduction to Modern Photogrammetry**, John Wiley & Sons, Inc., 479 p.
- Otepka, J.O., Hanley, H.B., ve Fraser, C.S., 2002, **Algorithm developments for automated offline vision metrology**, *Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium*, ISPRS, Corfu, Greece, September 1-2, pp. 60-67.
- Peipe, J. and Stephani, M., 2003, **Performance evaluation of a 5 megapixel digital metric camera for use in architectural photogrammetry**. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 34 (5/W12), pp. 259-261
- Remondino F., 2006, **Image-based modeling for object and human reconstruction**. PhD Thesis, ETH Mitteilungen 91 (No 16562), Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, Switzerland.
- Remondino F., Fraser C., 2006, **Digital camera calibration methods: considerations and comparisons**. *Inter-national Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and the Spatial Sciences*, 36(5), pp. 266-272.
- Shortis, M., and Beyer, H.A., 1997, **Calibration stability of the Kodak DCS420 and 460 cameras**. *Proceedings of SPIE Videometrics V*, Vol. 3174
- Shortis, M.R., Clarke, T.A. and Short, T., 1994, **Comparison of some techniques for the subpixel location of discrete target images**, *SPIE Proceedings*, Vol. 2350, P. 25.
- Wolf, P.R. and Dewitt, B.A., 2000, **Elements of photogrammetry with applications in GIS**, Boston, McGraw-Hill, Boston, 3rd ed.