

# GENELLEŞTİRİLMİŞ DLT METODU İLE DİJİTAL KAMERA GEOMETRİK KALİBRASYONU

Fevzi KARSLI <sup>1</sup>  
Eminnur AYHAN <sup>2</sup>  
Esra TUNÇ<sup>1</sup>

## ÖZET

Günümüzde dijital kameralar, özellikle yersel fotogrametrik uygulamaların temel veri kaynağı noktasında, hızla önem kazanmaktadır. Dijital kameralar mimari eserlerin ölçülendirilmesinden, endüstriyel elemanların ölçülmesine kadar uzanan geniş bir yelpazede kullanım imkanı bulmaktadırlar. Doğru ölçüye ulaşabilmek için, bu kameraların geometrik performanslarının bilinmesi zorunludur. Geometrik doğruluk, ancak ilgili kameranın kalibrasyonu yapılarak belirli parametrelerin (kamera sabiti, asal nokta koordinatları, distorsiyon, vb.) bulunması ile ortaya çıkarılabilir. Dijital kameraların geometrik kalibrasyonunda yaygın olarak temelde doğrusallık şartına dayanan DLT (Direct Lineer Transformation) ve ilave parametrelili ışın demetleri (Bundle Adjustment) yöntemleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada, matematik modeli daha da basitleştiren ve çözümü kolaylaştıran genelleştirilmiş DLT metodu ile dijital kamera kalibrasyonu 3 boyutlu test ağı kullanarak yapılmıştır. Bu metod ile belli sayıda resim ve kontrol noktaları göz önüne alınarak çözüm yapılmış ve elde edilen kalibrasyon parametrelerinin nokta konum duyarlıklarına etkisi irdelenmiştir. Bütün hesaplar ve değerlendirmeler Matlab 5.0 programlama dilinde hazırlanan yazılımla yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Dijital Kamera, DLT, Kalibrasyon

## ABSTRACT

### DIGITAL CAMERA GEOMETRIC CALIBRATION WITH MODIFIED DLT (DIRECT LINEER TRANSFORMATION) METHOD COMPARING

Nowadays, digital cameras are widely taking place especially in the point of basic data source of terrestrial photogrammetry applications. Digital cameras have found wide spread of application area opportunity from measuring architectural monuments to measuring industrial elements. You have to know the geometric performances of the camera to get the real measurements. Geometric accuracy can only get by finding some parameters like camera constant, principal point coordinates, distortion etc. In the calibration of digital cameras generally methods of DLT (Direct Linear Transformation), which based on collinearity condi-

<sup>1</sup>Arş.Gör (KTÜ Jeodezi ve Fotogrametri)

<sup>2</sup>Yrd.Doç.Dr. (KTÜ Jeodezi ve Fotogrametri)

*tion and bundle adjustment (ray bundle with additional parameters) are being used. In this paper, the calibration of digital camera has done with modified DLT method, which simplifies mathematical model and facilitates the solution by using 3D test field network. With this method, the solution has done by considering a few photographs and control points and the efficiency of the obtained calibration parameters on position sensitivity has been investigated. All calculations and evaluations are done in the Matlab 5.0 software.*

**Key Words:** Digital Camera, DLT, Calibration

## 1. GİRİŞ

Orta ve yüksek çözünürlüklü dijital kameralar son yıllarda fotogrametrinin ilgi alanını çekmektedirler. Bu kameralar, dijital depolama kapasiteleri, kamera kontrolü, analog-dijital dönüşümü (A/D) yapabilme ve bir çok özellikleri itibarıyla otomatik olarak görüntü kaydetme araçları olmaktadır. Avantaj sayılabilecek bu özelliklerdeki dijital kameralar mimari fotogrametrinin yanında endüstriyel kalite kontrolü gibi bir çok mühendislik uygulamaları için uygun ölçme araçlarıdır [Maas ve Niederost, 1997]. Fotogrametriciler dijital kameraları çok çeşitli amaçlar için kullanmaktadırlar. Dijital kameraların kalibrasyonu ve yönlendirilmesi metrik performanslarının belirlenmesi açısından önemli bir işlem olup, uygulamada hassas bir biçimde üç boyutlu geometrik bilgi çıkarmada öncül işlem güvenli sonuçların elde edilebilmesi için kalibrasyon aşamasıdır. Kalibrasyon, geometrik olarak ideal olan kayıt sisteminin (pinhole kamera) fiziksel gerçeklerine ait geometrik sapmalarının belirlenmesi işlemidir. Genelde resim ile ona karşılık gelen obje uzayı arasındaki ilişki göz önüne alınır. Fakat mercekleme sistemi, alıcı (sensör) ve kamera elektronik donanımını içeren komple bir kalibrasyon için daha global bir analiz gerekmektedir. Geometrik kalibrasyonda amaç, kamera iç ve dış yönlendirme parametreleri ile distorsiyon parametrelerini belirlemektir. Yani, ilgili kameranın fotogrametrik anlamda metrik ya da ölçü potansiyelinin ortaya çıkarılmasıdır. Fotogrametrik kamera kalibrasyonu için yaygın olarak bundle adjustment ve DLT metodları kullanılmaktadır. Bu çalışmada çözümde yaklaşık değer gerektirmeden direkt çözüm yapabilen geliştirilmiş ilave parametrelili DLT metodu ile Nikon E2 dijital kamerasıyla çekilmiş görüntüler kullanılarak kalibrasyon yapılmıştır.

## 2. ÇALIŞMADA KULLANILAN KAMERA

Nikon E2/E2s, 1280\*1000 geometrik çözünürlüklü, 24 bit renk derinliği, renkli 2/3" boyutlu CCD sensöre sahip ayna yansıtıcılı bir dijital kameradır. CCD boyutları 8.6\*6.8 mm, hafıza kartına görüntü kayıt kapasitesi 15 MB olmakla birlikte, bu hafıza 5 adet TIFF formatında görüntü veya 84 adete kadar JPG formatında görüntü alabilmektedir. Odak uzaklığı 35-70 mm arasında değişebilmektedir. Kamera ile çekilen görüntüler PCMCIA kartı yardımıyla bilgisayar ortamına aktarılabilir.



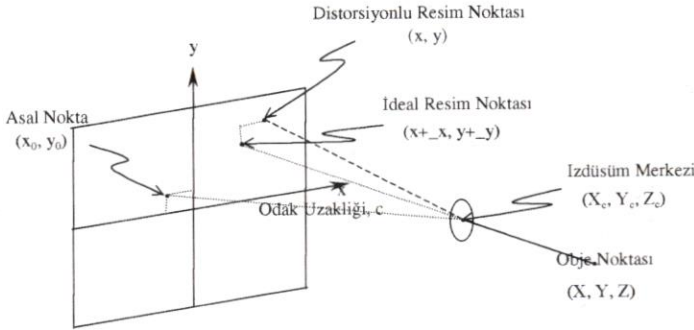
Sekil 1: Nikon E2/E2s Dijital Kamerası

### 3. MATEMATİK MODEL

Bu çalışmada kalibrasyon işlemi için geliştirilmiş direkt lineer transformasyon metodu (DLT) kullanılmıştır. DLT metodu kollinearite eşitliklerinin çözümü için 1970'li yıllarda geliştirilmiştir. Ana prensip, 3D obje koordinatları ile iki boyutlu resim koordinatları arasında basit bir denklemlerle dönüşüm yapmaktır. Bu metod iç yöneltme ve dış yöneltme elemanlarının bilinmemesi durumunda özellikle çok uygun çalışmaktadır. Distorsiyonun olmadığı ideal bir kamera sistemi için DLT eşitlikleri aşağıdaki biçimde ifade edilir.

$$\begin{aligned} x &= \frac{L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} \\ y &= \frac{L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} \end{aligned} \quad (1)$$

(1) eşitlikleri ideal bir kamera sistemini temsil etmektedir ki bu sistemde obje noktası, kamera odağı ve görüntü noktasını birleştiren bir doğrudan bahsetmek mümkündür. Eşitliklerdeki  $L_1, L_2, \dots, L_{11}$ 'den oluşan 11 adet DLT transformasyon parametresinin çözülebilmesi için en az 6 adet kontrol noktasına ihtiyaç vardır.



Sekil 2: Distorsiyonlu resim geometrisi



Optik distorsiyonun bulunduğu kameralarda görüntü noktası olması gereken konumdan sapar. Şekil 2’de sistematik olarak distorsiyonlu bir resim geometrisi gösterilmektedir. Buna göre (1) eşitliği yeniden düzenlenirse,

$$x + \Delta x = \frac{L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1}$$

$$y + \Delta y = \frac{L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1}$$

şeklini alır [Li, 1999]. (2) eşitliğinde gösterilen düzeltmeler lens distorsiyon parametreleri ve affin parametrelerini içermektedir. Bu parametrelerden K1, K2 ve K3 radyal distorsiyonu, P1 ve P2 teğetsel distorsiyonu, A1 eksenler arasındaki dikliği ve A2 ise x eksenı yönündeki ölçüğü göstermektedir. Bütün bu etkiler dikkate alındığında DLT eşitliklerine getirilen düzeltmeler aşağıdaki biçimde ifade edilebilir.

$$\Delta x = x'(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) + P_1(r^2 + 2x'^2) + 2P_2 x'y'$$

$$\Delta y = y'(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) + P_2(r^2 + 2y'^2) + 2P_1 x'y' + A_1 x' + A_2 y'$$

Burada (x', y') distorsiyonlu resim noktasının koordinatlarıdır. Bu koordinatlar ve r (çapsal uzaklık) aşağıdaki şekilde formüle edilir.

$$x' = x - x_0, \quad y' = y - y_0$$

$$r^2 = x'^2 + y'^2 \tag{4}$$

Görüntü koordinatları ile obje koordinatları arasındaki dönüşümün serbestlik derecesi 9’dur. Çünkü bilinmeyen iç (x0, y0, c) ve dış yöneltme elemanlarının (Xc, Yc, Zc, ..., \_, \_) sayısı 9 adettir. Halbuki DLT denklemlerinde 11 adet bilinmeyen parametresi vardır. Bunun için L katsayıları için iki adet şart denklemi yazılır. Bu denklemler,

$$\left( L_1^2 + L_2^2 + L_3^2 \right) - \left( L_5^2 + L_6^2 + L_7^2 \right) + \frac{\left( L_5 L_9 + L_6 L_{10} + L_7 L_{11} \right)^2 - \left( L_1 L_9 + L_2 L_{10} + L_3 L_{11} \right)^2}{L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2} = 0$$

$$L_1 L_5 + L_2 L_6 + L_3 L_7 - \frac{\left( L_1 L_9 + L_2 L_{10} + L_3 L_{11} \right) \left( L_5 L_9 + L_6 L_{10} + L_7 L_{11} \right)}{L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2} = 0 \tag{5}$$

şeklinindedir [Chen, 1997]. İç yöneltme parametreleri 11 DLT parametresinden aşağıdaki formlerle hesaplanabilir.

$$x_0 = \left( L_1 L_9 + L_2 L_{10} + L_3 L_{11} \right) / \left( L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2 \right)$$

$$y_0 = \left( L_5 L_9 + L_6 L_{10} + L_7 L_{11} \right) / \left( L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2 \right)$$

$$c_x = \sqrt{\left( L_1^2 + L_2^2 + L_3^2 \right) / \left( L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2 \right) - x_0^2}$$

$$c_y = \sqrt{\left( L_5^2 + L_6^2 + L_7^2 \right) / \left( L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2 \right) - y_0^2}$$

$$c = \left( c_x + c_y \right) / 2 \tag{6}$$

Arzu edilirse, aynı şekilde dış yöneltme parametreleri de 11 DLT parametresi yardımıyla aşağıdaki formüllerle hesaplanabilir.

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} L_1 & L_2 & L_3 \\ L_5 & L_6 & L_7 \\ L_9 & L_{10} & L_{11} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} L_4 \\ L_8 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\omega = \tan^{-1}(-L_{10}/L_{11})$$

$$\varphi = \sin^{-1}\left(-L_9/\sqrt{L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2}\right)$$

$$\kappa = \cos^{-1}\left((L_1 - x_0 L_9)/(c \cdot \cos \varphi \cdot \sqrt{L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2})\right)$$

11 DLT ve 7 distorsiyon parametresi için iteratif bir çözüm en küçük kareler tekniğine göre yapılır. Bütün bu denklemler lineer olmadıklarından çözüm algoritmasına geçmeden önce lineerleştirme işlemi yapılır. Çözüm için (2), (5) ve (6) nolu denklemler aşağıdaki forma getirilir.

$$f = x + \Delta x - \frac{L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1}$$

$$g = y + \Delta y - \frac{L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1}$$

$$c_1 = (L_1^2 + L_2^2 + L_3^2) - (L_5^2 + L_6^2 + L_7^2) + \frac{(L_5 L_9 + L_6 L_{10} + L_7 L_{11})^2 - (L_1 L_9 + L_2 L_{10} + L_3 L_{11})^2}{L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2}$$

$$c_2 = L_1 L_5 + L_2 L_6 + L_3 L_7 - \frac{(L_1 L_9 + L_2 L_{10} + L_3 L_{11})(L_5 L_9 + L_6 L_{10} + L_7 L_{11})}{L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2} \quad (8)$$

$$c_3 = x_0 - (L_1 L_9 + L_2 L_{10} + L_3 L_{11}) / (L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2)$$

$$c_4 = y_0 - (L_5 L_9 + L_6 L_{10} + L_7 L_{11}) / (L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2)$$

$$c_5 = c - \sqrt{(L_1^2 + L_2^2 + L_3^2) / (L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2)} - x_0^2$$

$$c_6 = c - \sqrt{(L_5^2 + L_6^2 + L_7^2) / (L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2)} - y_0^2$$

Bu formüllerde N adet kontrol noktası için 2N tane denklem yazılır ve buna ilaveten 6 adet şart denklemi yazılır. (8) nolu formüldeki  $c_1$  ve  $c_2$  L şartı,  $c_3$  ve  $c_4$  P şartı,  $c_5$  ve  $c_6$  ise C şartı olarak tanımlanmaktadır [Chen, 1997]. Bu şartlar gerçekleştiği zaman c parametreleri sıfır olacaktır. En küçük kareler ilkesi kullanılarak yapılan çözümde iterasyon belli bir sinir değerinin altına düşmesi durumunda kesilir. Jeodezide de olduğu gibi fotogrametrik ölçülerin değerlendirilmesi için en uygun kestirim metodlarından birisi en küçük kareler yöntemidir. Genel olarak formül yapısı aşağıdaki gibidir.

$$v = AX - l$$

$$X = (A^T A)^{-1} A^T l$$

Burada X bilinmeyenleri, v düzeltmeleri A ise katsayılar matrisini göstermektedir. Elde edilen sonuçların analizinde teorik ve deneysel varyans kavramları kullanılmıştır. Teorik varyans aşağıdaki formüllerle açıklanabilir.

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum \sigma_{x_i}^2}{n_x}}, \quad \sigma_y = \sqrt{\frac{\sum \sigma_{y_i}^2}{n_y}}, \quad \sigma_{xy} = \sqrt{\frac{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}{2}}, \quad \sigma_z = \sqrt{\frac{\sum \sigma_{z_i}^2}{n_z}} \quad (10)$$

n, kontrol noktası sayılarını göstermektedir.  $\sigma_{x_i} = \hat{\sigma}_o \sqrt{q_{xx_i}}$  obje noktalarının standart sapmasını göstermektedir.  $\hat{\sigma}_o$  karesel ortalama hata ve  $q_{xx_i}$  ters ağırlık matrisinin kösedan elemanlarını göstermektedir. Deneysel varyans ise kontrol noktalarının hesaplama sonucundaki koordinat farklarından hesaplanır ve aşağıdaki şekilde formüle edilir.

$$\mu_x = \sqrt{\frac{\sum \Delta x_i^2}{n_x}}, \quad \mu_y = \sqrt{\frac{\sum \Delta y_i^2}{n_y}}, \quad \mu_z = \sqrt{\frac{\sum \Delta z_i^2}{n_z}}, \quad \mu_{yx} = \sqrt{\frac{\mu_x^2 + \mu_y^2}{2}} \quad (11)$$

$$\Delta x = x_{olc} - x_{hes}, \quad \Delta y = y_{olc} - y_{hes}, \quad \Delta z = z_{olc} - z_{hes}$$

Burada da referans nokta koordinatlarının olcu ve hesap edilen koordinatları kullanılmaktadır [Remondino, 2000, 2002].

#### 4. UYGULAMA

Geometrik kalibrasyon için üç boyutlu koordinatları bilinen bir test ağına nikon kamerasıyla iki farklı mercek ile uygun geometrik koşulları sağlayacak şekilde ölçümler yapılmıştır. Uca boyutlu test ağı şekil .. da gösterilmektedir. Ölçüler 3 ayrı noktadan olmak üzere her iki mercek için toplam 6 resim elde edilmiştir. Resim koordinat ölçmeleri Elcovison 10 yazılımıyla yarı otomatik olarak ölçülmüştür. DLT metodu ile yapılan değerlendirme iki grup halinde yapılan ölçüler irdelenmiştir. Değerlendirme aşamasında kullanılan nokta sayısı 49'dur. Ölçüler ve yapılan değerlendirme sonuçları her iki mercek için tablo 1 ve tablo 2'de verilmiştir.

Değerlerden de görüldüğü üzere DLT yaklaşımıyla çözümde yeterli derecede konum duyarlılığına ulaşılabilmektedir. Sonuç olarak genelleştirilmiş DLT yönteminin kamera kalibrasyonu çalışmalarında kullanılabileceği ortaya çıkarılmıştır. Uygun geometri ve daha fazla sayıda resim kullanılması durumunda daha iyi doğruluk elde etmek mümkündür. Ayrıca bu metod, ışın demetleri yöntemi için yaklaşık değerlerin elde edilmesi için bir ön adım olarak nitelendirilebilir.

	24 mm	50 mm
Kamera Sabiti (mm)	7.459	15.682
Asal Nokta X (mm)	0.155	0.183
Asal Nokta Y (mm)	-0.059	-0.191
x-yönündeki ölçek	-0.901	-0.950
K1	3.39e-03	1.095e-03
K2	-5.07e-04	-1.126e-04
K3	2.40e-05	3.992e-06
P1	-2.50e-04	-1.299e-04
P2	9.85e-05	1.239e-04

Tablo 1: Her iki mercek elde edilen iç yöneltme ve distorsiyonlar

	24 mm	50 mm
$\sigma_x$ (mm)	0.33	0.20
RMS <sub>x</sub> (mm)	0.88	0.62
$\sigma_y$ (mm)	1.37	1.15
RMS <sub>y</sub> (mm)	1.93	1.65
$\sigma_z$ (mm)	1.19	0.79
RMS <sub>z</sub> (mm)	2.43	2.98
$\sigma_{xy}$ (mm)	0.10	0.83
RMS <sub>xy</sub> (mm)	1.50	1.25

Tablo 2: Her iki mercek için hesaplanan deneysel ve teorik varyans değerleri.

## 5. KAYNAKLAR

- Chen, F.J., "Application of Least-Squares Adjustment Technique to Geometric Camera Calibration and Photogrammetric Flow Visualization", ISA 43rd International Instrumentation Symposium, May 4-8, Orlando, Florida, (1997).
- Li, X., "Photogrammetric Investigation into Low Resolution Digital Camera Systems", Ph.D, Department of Geodesy and Geomatics, The University of New Brunswick, Canada. (1999).
- Maas, H.G., Niederost, N., "The Accuracy Potential of Large Format Still Video Cameras", Videometric V, SPIE Proceedings Series Vo 3174, SPIE's 42nd Annual Meeting, San Diego, (1997).
- Remondino, F., "Investigation and Calibration of Digital Camera Sony DSC-F505 Cybershot", Internal Report, Institute of Geodesy and Photogrammetry-ETH Zurich, June, Switzerland, (2000).
- Remondino, F., "3-D Reconstruction of Articulated Objects from Uncalibrated Images", Three-Dimensional Image Capture and application V, SPIE Electronic Imaging, Proceeding of SPIE 4661, San Jose, USA, (2002).