

Yersel Lazer Tarayıcılara Kamera Takılması ve Tarayıcı Koordinatlarına Göre Kamera Konumunun Hesaplanması

(Camera Mounting to the Terrestrial Laser Scanners and Estimation of the Camera Position with Respect to the Scanner Reference Frame)

Cihan ALTUNTAŞ¹, Norbert PFEIFER², Camillo RESSL², Ferruh YILDIZ¹

¹ Selçuk Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Konya

² Vienna University of Technology, Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Vienna, Austria
caltuntas@selcuk.edu.tr

ÖZET

3B konum verisi ölçmede ve modellemede kullanılan en son teknik lazer tarama yöntemidir ve mühendislik uygulamalarındaki popülaritesi her geçen gün artmaktadır. Ancak lazer tarayıcılar 3B modelleme ve görüntüleme için tek başına yeterli değildir. Özellikle nokta bulutlarının birleştirilmesi, taranamayan alanların ölçülmesi, doku kaplama ve diğer görüntüleme uygulamalarında tarayıcı verilerinin fotogrametrik verilerle birlikte kullanılması gerekir. Lazer tarayıcı ve kamera birleşiminden oluşan sistem pek çok amaç için kullanılabilir esnek bir sistemdir. Lazer tarayıcıların çoğunda bütünleşik halde kamera bulunmaktadır ancak bu kameraların çoğu düşük çözünürlüklüdür ve kameralar tarayıcıdan bağımsız kullanılamaz. Bu çalışmada lazer tarayıcıların daha yüksek çözünürlüklü kameralarla birlikte kullanılabilmesi için tarayıcıya kamera monte edilmesi ve aralarındaki dış parametrelerin hesaplanması anlatılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Yersel Lazer Tarayıcı, Sensör Birleşimi, Kamera Konumu, Dış Parametreler, Doğrusallık Koşulu.

ABSTRACT

The latest technique used in measuring and modeling to obtain 3D spatial information is laser scanning technique and its popularity in engineering applications is increasing by each day. However, scanned data should be used in conjunction with photogrammetric data especially to registration of 3D point clouds, measure of not scanned areas, texture mapping and other imaging applications. Laser scanner and camera combination is a flexible system that can be used for many purposes. Most of the laser scanners include integrated camera which have often low-resolution and can not be used independently from the scanner. In this study, mounting of the camera to the laser scanner and estimation of orientation parameters between them are explained to use them in collaborate.

Key Words: Terrestrial Laser Scanner, Sensor Combination, Camera Position, Exterior Parameters, Collinearity Condition.

1. GİRİŞ

Lazer tarayıcılar çok yüksek hız ile istenilen sıklıkta ölçme alanını tarayarak üç boyutlu (x,y,z) nokta bilgisi ölçerler. Ölçme hızı, nokta sıklığının ayarlanabilmesi, bilgi çıkarımındaki kolaylık ve ölçme verisinin değişik formatlarda görüntülenebilmesi sistemin üstün yönlerindedir. Lazer tarama ölçmeleri havadan uçak, helikopter gibi araçlardan ya da yerden yapılmaktadır. Yersel ölçmeler için kullanılanlar yersel lazer tarayıcı (YLT) olarak adlandırılmaktadır ve bu çalışmanın konusudur. Lazer tarayıcılar ışığın gidiş-geliş zamanı (time-of-flight) ya da faz farkı ile ölçülen noktanın tarayıcıdan olan mesafesini, ölçme doğrusunun belirli bir doğrultuyla olan yatay ve düşey açısını ve yansıma değerini ölçmektedir (Pfeifer vd., 2007). YLT'ların çoğunda bütünleşik kamera bulunmaktadır ve bu kamera görüntüleri yardımıyla ölçülen noktalara renk değeri de atanabilmektedir. Ölçme alanı çok sık aralıklarla tarandığından ölçme verisi nokta bulutu şeklindedir. Nokta bulutları obje yüzeyini çok iyi temsil ettiği için her türlü geometrik bilgi gerçek değere çok yakın olarak elde edilebilmektedir. Ayrıca nokta bulutları üzerine fotoğraf dokusu kaplanılarak objenin gerçeğe en yakın görünümü ölçekli 3 boyutlu (3B) modeli oluşturulabilmektedir.

YLT'lar bugüne kadar tarihi eserlerin belgelenmesi ve 3B modelleme (Yastikli, 2007; Akca vd., 2006; El-Hakim vd., 2004), deformasyon ölçmeleri (Tsakiri vd., 2006) ve mimarlık (Schueremans vd., 2009) gibi pek çok mühendislik uygulamasında kullanılmıştır. Özellikle tarihi ve kültürel objelerin ölçülmesi ve modellenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Kamera (CCD algılayıcı) ışın görüntülemek, tarayıcı ise mesafe ölçmek için kullanıldığından kamera ve tarayıcı birleşiminden oluşan bu sensör sistemi melez sistem olarak da adlandırılmaktadır. Fotoğraflar; tarayıcı noktalarına renk değeri atanmasında, nokta bulutu üzerine fotoğraf dokusu kaplamada ve

nokta bulutlarının birleştirilmesinde kullanılmaktadır. Ancak bu kameraların çözünürlükleri çoğu kez düşüktür ve her ihtiyaca cevap verememektedir. Nokta bulutunun yüksek çözünürlüklü kamera görüntüsü ile renklendirilmesi durumunda daha iyi bir görüntü elde edilebilecektir. Ayrıca nokta bulutuna fotoğraf dokusu kaplanmasında projeksiyon merkezi koordinatlarının hesaplanması gerekir. Bunun için fotoğrafta ve nokta bulutunda tanımlı kontrol noktaları yardımıyla kamera çekim merkezi koordinatları hesaplanmalıdır. Lazer tarayıcı ve kamera birleşiminde kameranın tarayıcı koordinat sistemine göre konumu dış parametrelerle zaten bilindiğinden fotoğraflar doğrudan nokta bulutu üzerine kaplanabilecektir. Lazer tarayıcı ölçülerinin işlenmesinde en önemli işlem adımı nokta bulutlarının birleştirilmesidir ve hala önemli bir araştırma konusudur. Lazer tarama ölçülerinin birleştirilmesi doğrudan nokta bulutu yada fotoğraflar yardımıyla yapılmaktadır (Altuntaş vd., 2008).

Nokta bulutu yardımıyla yapılan birleştirmeler; objenin geometrik özelliklerine bağlı olarak uygulanan iteratif en yakın nokta (ICP) (Besl vd., 1992; Chen vd., 1992; Zhang, 1994) ve en küçük karelerle 3B görüntü eşleme (LS3D matching) (Gruen vd., 2005) yöntemleridir. Ölçme alanına yerleştirilen hedef işaretleri (Al-Manasir vd., 2006b; Akca, 2003; Scaioni, 2002) ve nokta bulutundan belirli geometrik detayların çıkarılıp eşleştirilmesiyle de nokta bulutları birleştirilmektedir (Briese vd., 2008). Nokta buluları tarayıcı ile birlikte kullanılan kameradan alınan fotoğraflarla da birleştirilebilmektedir (Altuntas vd., 2010; Al-Manasir vd., 2006a; Dold vd., 2006; Forkuo, 2005).

Eğer taranan yüzey belirgin geometrik detaylar içermiyorsa nokta bulutundan eşlenik nokta seçimi oldukça zor olmaktadır. Bu durumda nokta bulutları tarayıcı ile birlikte kullanılan kamera görüntüleri ile birleştirilebilir. Fotoğraflar çok iyi doku bilgisi içerdiğinden eşlenik nokta tespiti kolaylıkla yapılabilmektedir. Fotoğraflar yardımıyla yapılan birleştirmede nokta bulutları arasındaki bindirme oranı az olsa bile ilave fotoğraflarla birlikte ölçüler yüksek doğrulukla birleştirilebilmektedir. Diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında nokta bulutları fotoğraflar yardımıyla oldukça yüksek hassasiyetli olarak birleştirilebilmektedir. Bu nedenlerden dolayı lazer tarayıcılara yüksek çözünürlüklü kamera takılması ve lazer tarama ve fotogrametrik verilerin birlikte kullanılması gerekir.

Kameradan alınan görüntülerin lazer tarayıcı ölçüleri ile birlikte kullanılabilmesi için tarayıcıya takılan kamera ve lazer tarayıcı koordinat sistemleri arasındaki dönüklük (ω, ϕ, κ) ve ötelemelerin (X_c, Y_c, Z_c) bilinmesi gerekir. Bu makalede bu dönme ve ötelemeler dış parametreler olarak ifade edilmektedir. Dış parametreler aynı zamanda projeksiyon merkezinin lazer tarayıcı koordinat sistemine göre koordinatlarını ifade etmektedir. Bu çalışmada Optech Ilris 3D lazer tarayıcısına 8 Mega piksel çözünürlüklü Nikon P50 kamera monte edilmiş ve kamera ve tarayıcı arasındaki dış parametreler hesaplanmıştır. Parametre hesabı için özel bir test alanı oluşturulmuştur. Dış parametrelerin doğruluğu geliştirilen üç kontrol yöntemi ile kontrol edilmiştir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Kamera ve lazer tarayıcı arasındaki dış parametrelerinin hesaplanmasında farklı test alanları ve hesaplama teknikleri kullanılmıştır. Al-Manasir ve Fraser (2006a) de Riegl LMS-Z210 yersel lazer tarayıcı üzerine Nikon D100 kamera monte edilmiş ve dış parametrelerin hesaplanmasında duvar üzerinde oluşturulan test alanı kullanılmıştır. Kamera kalibrasyon bilgileri parametre hesabından önce test alanının 14 fotoğrafı ve 160 kontrol noktası kullanılarak 0.05 piksel hassasiyetle hesaplanmıştır. Test ölçüsü için test alanı tek bir istasyondan taranmış ve aynı anda tarayıcı üzerindeki kamera ile fotoğrafı çekilmiştir. Test alanı üzerinde işaretlenen 79 noktada doğrusalılık koşulu ile dış parametreler hesaplanmıştır.

Aguilera vd. (2009) da dış parametrelerin hesaplanmasında sayısal kamera görüntüsü ve lazer tarayıcı ölçülerinden elde edilen 2B mesafe görüntüleri ile birlikte kullanılmıştır. Sayısal kamera görüntüsü yalnızca piksel koordinatlı bir görüntü iken, range image piksel koordinatlarıyla birlikte 3B lazer tarayıcı koordinatlarına da sahiptir. Hesaplama için herhangi bir test alanı oluşturulmamış seçilen bir obje için yapılan lazer taraması ve sayısal görüntü kullanılmıştır. Önce her iki fotoğraf aynı boyuta getirilmiş daha sonra bu fotoğraflardan Förstner operatörü (Förstner vd., 1987) ile detaylar çıkarılarak korelasyonlu olarak eşleştirilmiştir. RANSAC (Fischler vd., 1981) yöntemiyle sayısal görüntüdeki piksel koordinatları ve mesafe görüntüsündeki (range image) obje koordinatları eşleştirilerek doğrusalılık koşulu ile parametreler hesaplanmıştır.

Wendt ve Dold (2005) de parametre kestirimi için noktaların aynı düzlemde yer almadığı özel bir test alanı oluşturmuştur. Bu test alanı kullanılarak kamera kalibrasyonu ve parametre kestiriminin birlikte ve ayrı yapılması durumunda elde edilen sonuçlar verilmiştir. Kamera kalibrasyon parametrelerinin doğruluğunun dış parametrelerin hesaplanmasında en önemli etken olduğu gösterilmiştir. Kamera kalibrasyonunun dış parametrelerden bağımsız olarak hesaplanması gerektiği belirtilmiştir. (El-Hakim vd., 1996) kamera kalibrasyonu ve dış parametrelerin tespitini birlikte yapmışlar ve bunun için farklı doğrultuda üç düşey düzlemde noktalar işaretlenmiş ve farklı açılardan yapılan ölçülerle dış parametreler hesaplanmıştır.

Barnea ve Filin (2007) de tarayıcı üzerine monte edilen kamera görüntülerinden SIFT (Lowe, 2004) operatörü yardımıyla eşlenik noktalar tespit edilerek bu noktalara karşılık gelen lazer tarayıcı noktaları bulunmuş, daha sonra RANSAC algoritması ile bu noktalar eşleştirilerek dönüşüm parametreleri hesaplanmıştır. Benzer bir yöntem Forkuo ve King (2004) de Harris kenar çıkarma operatörü (Harris vd., 1988) ile uygulanmıştır.

3. ÇÖZÜM YÖNTEMİ

Nikon P50 fotoğraf makinesi özel bir aparat yardımıyla Optech Ilris 3D lazer tarayıcısına monte edildi (Şekil 2). İstenildiğinde bu alet sayesinde kamera tarayıcıdan sökülüp bağımsız olarak kullanılabilir ve tekrar takılabilir. Eğer kamera tarayıcıya sabit olarak monte edilmezse her söküp takmada kameranın tarayıcıya göre konumu değişir ve parametrelerin tekrar hesaplanması gerekir. Bu nedenle kameranın sabitlenmesi, yani her defasında tarayıcıya göre aynı pozisyonda kalacak şekilde takılması çok önemlidir.

Tarayıcı ve kamera arasındaki dış parametrelerin hesaplanması 2B resim koordinatları ile 3B tarayıcı koordinatları arasındaki dönüşüm probleminin çözümünü gerektirir. Bu problem doğrusallık (collinearity) koşulunu kullanarak uzay geriden kestirme yöntemi ile çözülebilir. Çözüm için test alanının tek bir istasyondan taranması ve fotoğrafının çekilmesi yeterlidir. Altı bilinmeyen parametrenin hesaplanabilmesi için kamera ve tarayıcı koordinatları bilinen en az üç ortak nokta yeterlidir. Ancak sonuçların güvenilirliğini ve hassasiyetini artırmak için daha fazla nokta ile çözüm yapılmalıdır. Nokta sayısı arttığında en

küçük kareler yöntemi ile tekrarlamalı olarak çözüm yapılır. Hesaplama için kameranın iç kalibrasyonunun önceden hassas olarak yapılması gerekir. Çünkü doğrusallık koşulunda odak uzaklığı, asal nokta koordinatları ve ışınsal (radyal) distorsiyon katsayıları kullanılacaktır.

Dış parametrelerin hesaplanması için Selçuk Üniversitesi Fotogrametri Laboratuvarında özel bir test alanı oluşturuldu. 3x3.6m² lik bir alanda 20 cm aralıklarla 270 test noktası işaretlendi. Noktalar siyah zemin üzerine 3cm çaplı beyaz noktalar olarak işaretlendi (Şekil 2). Kamera kalibrasyonu parametre hesabından bağımsız olarak önceden yapılmıştır. İstenilirse kamera kalibrasyonu da parametre hesabı ile birlikte yapılabilir. Ancak bunun için kullanılacak test alanında noktaların farklı düzlemlerde dağılacak şekilde oluşturulması gerekir (Wendt vd., 2005).

a. Kamera Kalibrasyonu

Kamera kalibrasyonu için Topcon PI 3000 kamera kalibrasyon yazılımı kullanıldı. Bu programın kullandığı kalibrasyon ağının Nikon P50 kamera ile değişik açılardan fotoğrafı çekilerek programa aktarıldı. Fotoğraflar ışın demetleri dengelemesi ile değerlendirilerek kamera kalibrasyon değerleri hesaplandı. (1) bağıntısı yardımıyla distorsiyon değerleri hesaplanarak kameranın distorsiyon grafiği oluşturuldu (Şekil 1).

$$\Delta r = g_{13} \cdot \rho \cdot (\rho^2 - \rho_0^2) + g_{14} \cdot \rho \cdot (\rho^4 - \rho_0^4) \quad (1)$$

$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (2)$$

$$\Delta x = (\Delta r / \rho) \cdot x ; \Delta y = (\Delta r / \rho) \cdot y \quad (3)$$

Burada;

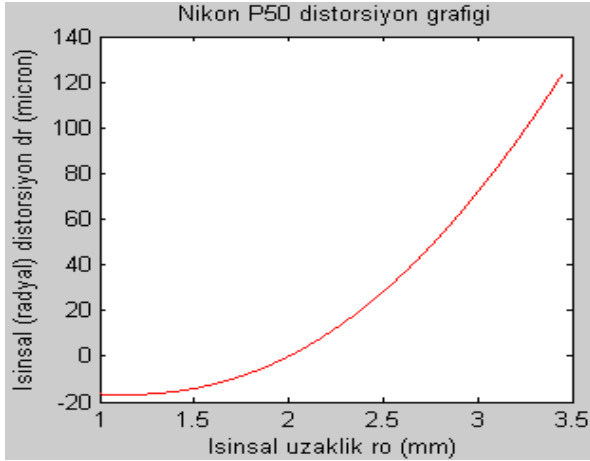
g_{13}, g_{14} : Işınsal distorsiyon katsayıları,

ρ_0 : 1.3872mm [genellikle ρ_0 resim iç çemberinin yarıçapının 2/3 ne eşittir. (Luhmann vd., 2007).]

ρ : Işınsal uzaklık,

x, y : Resim koordinatları,

$\Delta x, \Delta y$: Distorsiyon hatası.



Şekil 1. Nikon P50 kamera distorsiyon grafiği.

| | |
|-----------------------|------------------|
| Odak uzaklığı | : 4.620926mm |
| Asal nokta x_0 | : 2.675956mm |
| Asal nokta y_0 | : 2.062541mm |
| Işınal distorsiyon K1 | : 0.005928311 |
| Işınal distorsiyon K2 | : -8.663903e-005 |
| Piksel boyutu | : 1.7 mikron |

b. Test Ölçüsü

Test ölçüsü için kamera özel aparatı ile tarayıcıya monte edildi. Lazer tarayıcı, test alanı hem tarayıcıdan hem kameradan tam olarak görülebilecek şekilde test alından 5.5m uzakta bir noktaya kuruldu. Test alanı ortalama 2mm nokta sıklığı ile tarandı ve aynı zamanda tek kare fotoğrafı çekildi.

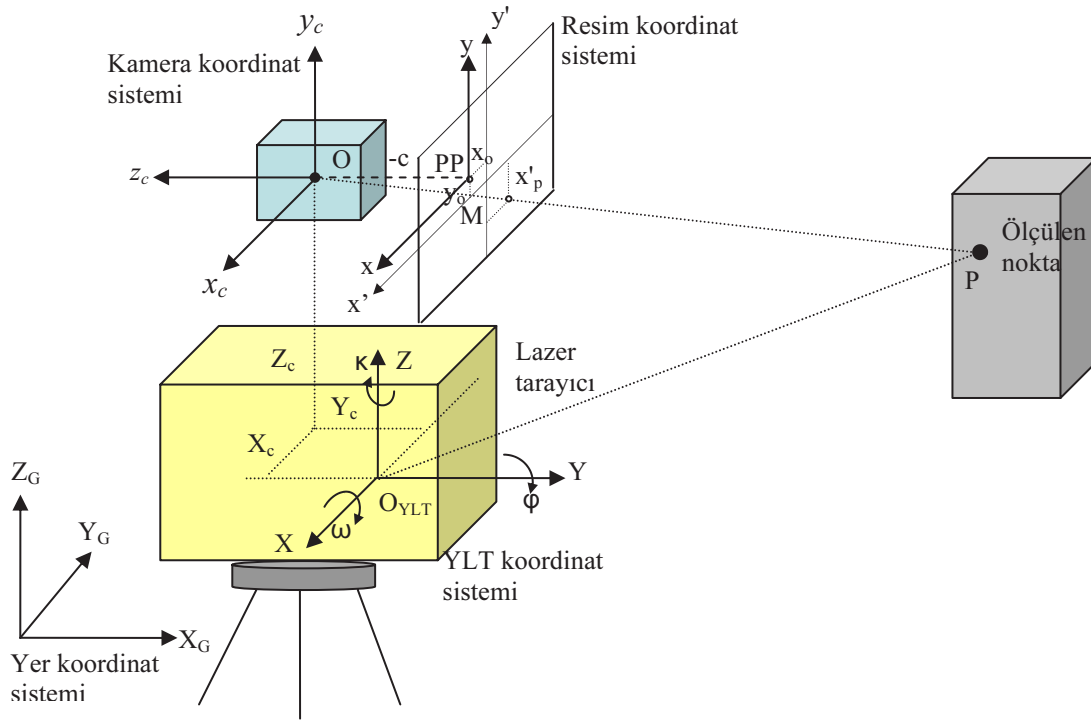


Şekil 2: Test ölçüsü

4. PARAMETRELERİN HESAPLANMASI

Hesaplanacak parametreler, kamera ve tarayıcı arasındaki dış parametreler başka bir deyişle kameranın tarayıcı koordinat sistemine göre konumudur. Burada çözülecek problem 2B resim koordinat sistemi ile 3B tarayıcı koordinat sistemi arasındaki dönüşüm parametrelerinin ($X_c, Y_c, Z_c, \omega, \phi, \kappa$) hesaplanmasıdır (Şekil 3). Fotogrametride pek çok problemin çözümünde olduğu gibi bu problemin çözümünde de doğrusallık (collinearity) koşulundan yararlanır. Perspektif izdüşümde doğrusallık koşulu izdüşüm merkezi, resim noktası ve obje noktasının aynı doğru üzerinde olmasını ifade eder (Kraus, 2007). Doğrusallık koşulu resim koordinatlarına etki eden distorsiyon hatası, refraksiyon, yer küreselliği gibi hatalarda hesaba katılarak genişletilebilir.

İlk olarak hesaplamada kullanılacak test noktalarının tarayıcı ve resim koordinatları okundu. Nokta koordinatlarının hedef işaretlerinin tam ortası olması için Matlab da kod hazırlandı. Tarayıcı verilerinden yansıma görüntüsü (intensity image) ve mesafe görüntüsü (range image) (Karel vd., 2009) oluşturularak bu görüntü üzerinden test noktalarının tarayıcı koordinatları hedef işaretlerinin tam ortasından ölçüldü. Resim koordinatları başlangıcı resmin sol üst köşesi, üst kenar y eksenini, düşey kenar x eksenini olan piksel koordinat sisteminde ölçüldü. Daha sonra x_0, y_0 asal nokta koordinatları ile başlangıcı asal nokta olan resim koordinatları elde edildi.



Şekil 3. 2B Kamera ve 3B lazer tarayıcı koordinat sistemleri.

Distorsiyon hatası da dikkate alındığında resim ve tarayıcı koordinatları arasındaki ilişki (4) bağıntısı ile ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{TLS}} = \lambda \cdot R \cdot \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -c \end{bmatrix}_{\text{image}} - \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Bu bağıntıdan hareketle doğrusallık koşulu

$$x = x_0 - c \frac{r_{11}(X - X_c) + r_{21}(Y - Y_c) + r_{31}(Z - Z_c)}{r_{13}(X - X_c) + r_{23}(Y - Y_c) + r_{33}(Z - Z_c)} + \Delta x$$

$$y = y_0 - c \frac{r_{12}(X - X_c) + r_{22}(Y - Y_c) + r_{32}(Z - Z_c)}{r_{13}(X - X_c) + r_{23}(Y - Y_c) + r_{33}(Z - Z_c)} + \Delta y \quad (5)$$

dir (Kraus, 2007). Burada;

x, y : Resim koordinatları,

x_0, y_0 : Asal nokta (principal point) koordinatları,

c : Odak uzaklığı,

X, Y, Z : Lazer tarayıcı koordinatları,

X_c, Y_c, Z_c : Kamera izdüşüm merkezinin tarayıcı koordinat sistemine göre koordinatları,

$R_{\omega\phi\kappa}$: 3x3 boyutlu döndürme matrisi,

$\Delta x, \Delta y$: İşınsal distorsiyon düzeltmesidir.

Doğrusallık koşulunda bilinmeyenler için türev alınarak hata denklemleri (6) oluşturuldu.

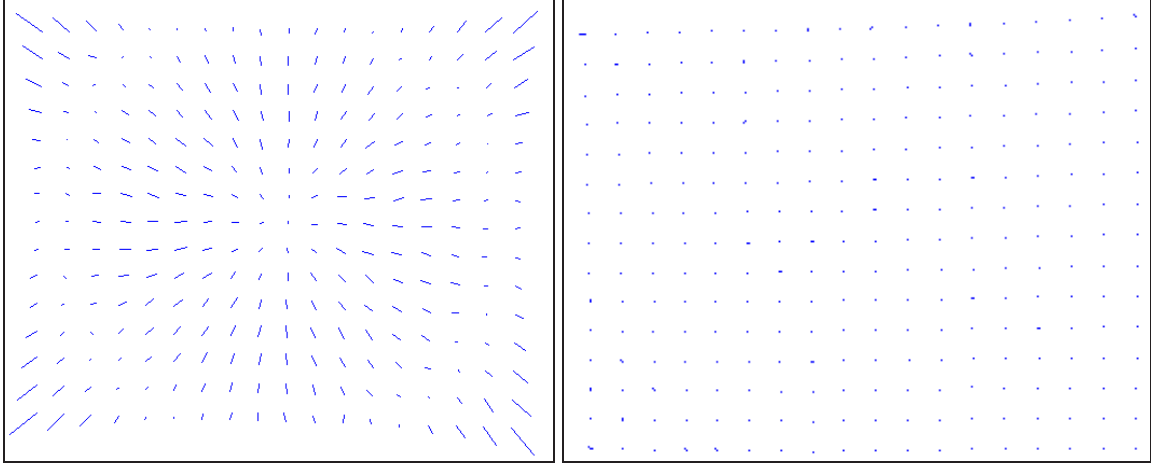
$$v_x = \frac{\partial x}{\partial X_c} dX_c + \frac{\partial x}{\partial Y_c} dY_c + \frac{\partial x}{\partial Z_c} dZ_c + \frac{\partial x}{\partial \omega} d\omega + \frac{\partial x}{\partial \phi} d\phi + \frac{\partial x}{\partial \kappa} d\kappa \quad (6)$$

$$v_y = \frac{\partial y}{\partial X_c} dX_c + \frac{\partial y}{\partial Y_c} dY_c + \frac{\partial y}{\partial Z_c} dZ_c + \frac{\partial y}{\partial \omega} d\omega + \frac{\partial y}{\partial \phi} d\phi + \frac{\partial y}{\partial \kappa} d\kappa$$

İterasyon için hesaplanacak parametrelerin ilk yaklaşık değerlerinin önceden bilinmesi gerekir. Burada ilk yaklaşık değerler koordinat sistemlerinin konumuna göre $X_c=0m$, $Y_c=0m$, $Z_c=0.20m$, $\omega=100grad$, $\phi=0grad$, $\kappa=0grad$ olarak belirlenmiştir. İstenilirse bilinmeyenlerin ilk yaklaşık değerleri hesapla da bulunabilir. Her iterasyonda bilinmeyenler için bir önceki iterasyonda bulunan değerler kullanılarak birkaç iterasyon sonunda dış parametreler $\sigma_0=0.34$ piksel veya $0.58\mu m$ karesel ortalama hata ile hesaplandı. Hata vektörünün resim üzerindeki görüntüsü Şekil 4'de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi kameranın ışınsal distorsiyon hatası mutlaka hesaba katılmalı ve etkisi giderilmelidir. Dış parametrelerin her biri için hesaplanma hassasiyeti Tablo 1 de verilmiştir.

Tablo 1. Dış parametrelerin hesaplanma hassasiyeti.

| X_c (mm) | Y_c (mm) | Z_c (mm) | ω (radyan) | ϕ (radyan) | κ (radyan) |
|---------------|---------------|---------------|----------------------|--------------------|----------------------|
| 0.8 | 0.1 | 0.9 | 0.000185 | 0.000156 | 0.000030 |

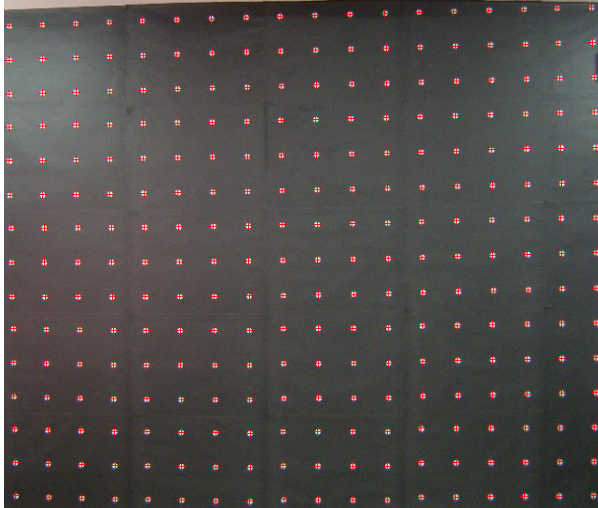


Şekil 4. Resim koordinatlarına distorsiyon düzeltmesi getirilmeden (solda) ve distorsiyon düzeltmesi getirildikten sonraki hatalar (sağda).

5. PARAMETRELERİN KONTROLÜ

Kontrol 1: Test noktalarının resim koordinatlarının hesaplanması

Hesaplanan dış parametreler ile 270 adet test noktasının tarayıcı koordinatlarından resim koordinatları hesaplandı ve bilinen resim koordinatları ile karşılaştırıldı. Noktaların hesaplanan koordinatları resim düzleminde görüntülendi ve ne kadar doğrulukla çakıştıkları kontrol edildi. Hesaplanan koordinatların resim üzerindeki görüntüleri ile oldukça iyi çakıştığı görülmektedir (Şekil 5).



Şekil 5. Lazer tarayıcı koordinatlarından hesaplanan resim koordinatlarının resimdeki görüntüsü ile çakışması.

Kontrol 2: Lazer tarayıcı ölçülerine fotoğraftan renk değeri atanması

Bu kontrolde bütün lazer tarama noktalarına kamera ile alınan fotoğraftan renk atanması yapıldı. Yani noktalar takılan harici kamera görüntüsü ile yeniden renklendirildi. Dış parametreler ile bütün noktaların resim koordinatları hesaplanarak her noktaya karşılık gelen renk değerleri (RGB) bulundu. Bu renk değerleri ve tarayıcı koordinatları ile noktalar VRML formatında dosyaya kaydedildi.

Aynı şekilde tarayıcı koordinatları ve yansıma değerleri ile de ikinci bir VRML dosya oluşturuldu. Bu iki görüntü dosyası VRML görüntüleyicisinde görüntülenerek noktaların yeni renk değerleri ile görüntüleri karşılaştırıldı (Şekil 6). Yeni renkler dış yöneltme parametreleri ile hesaplandığından bu işlem aynı zamanda hesaplanan parametrelerin kontrolüdür.



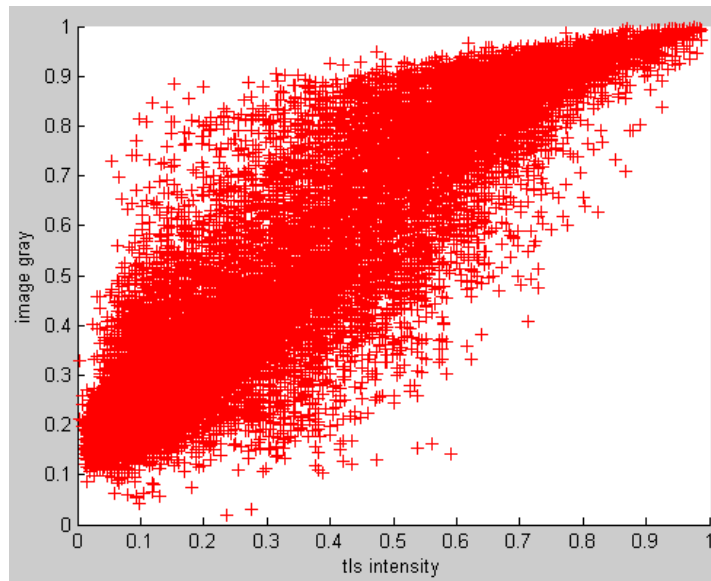
Şekil 6. Lazer tarama verisinin kamera renkleri (solda) ve yansımaya değerleri ile görüntüleri (sağda).

Kontrol 3: Yansımaya değerleri ve fotoğraf renkleri grafiği

Kamera fotoğrafının renk değerleri ile YLT'nin yansımaya değerleri karşılaştırıldı. Bunun için taranan bütün noktaların fotoğraf renkleri (Nikon P50) ve yansımaya değerleri (Ilris 3D) bir grafik üzerinde görüntülendi. Fotoğraf renklerini grafikte gösterebilmek için RGB değerlerine karşılık gelen gri ton değerleri hesaplandı.

Şekil 7'da görüldüğü gibi grafik çok az eğriliği olan bir doğrudur. Bu da bize noktaların yansımaya değerlerine karşılık gelen renk değerlerinin eşleşme durumunu yani birisi yerine diğerinin alınabilirliğini göstermektedir. İdeal durumda yani ölçülerin mutlak doğru olması durumunda grafikte noktalar 45 derece eğimli bir doğru oluşturması

gerekir. Oluşturulan grafikte noktaların dağılımının ideal doğruya çok yakın bir doğru oluşturduğu görülmektedir. Eğer parametreler hatalı olsaydı grafikte noktalar gelişigüzel dağılırdı. Yani bu dış parametrelerle resimdeki bir noktanın lazer nokta bulutundaki karşılığı doğru hesaplanamayacağından fotoğrafta açık renkli olarak gösterilen nokta lazer tarama ölçüsünde koyu renkli bir noktaya karşılık gelirdi. Grafikte çok az sayıda oluşan dağınık noktalar dış parametre hatasından değil muhtemelen resim çekiminde oluşan ışın yansımından kaynaklanmaktadır. Bu grafik dış parametrelerle elde edildiği için hesaplanan parametrelerin doğru bir eşleşme sağladığı yani bu kontrolde de parametrelerin hesaplama doğruluğunun çok iyi olduğu görülmektedir.



Şekil 7. Yansımaya değerleri ve fotoğraf renkleri ilişkisi grafiği.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada Optech Ilris 3D lazer tarayıcısı üzerine Nikon P50 fotoğraf makinesi monte edilmiş ve bunlar arasındaki dış parametreler hesaplanmıştır. Parametreler $\sigma_0=0.34$ piksel karesel ortalama hata ile hesaplanmıştır. Parametrelerin kontrolü için üç farklı kontrol yöntemi geliştirilmiş ve bütün kontrollerde parametrelerin yüksek doğrulukla hesaplandığı görülmüştür. Farklı kamera ve tarayıcı birleşimi için bu parametreler hesaplanabilir. Burada en önemli nokta kameranın görüş açısı ile lazer tarayıcının görüş açısının birbirine uyumlu olmasıdır. Eğer kameranın görüş açısı lazer tarayıcıdan çok büyük olursa test alanı fotoğrafta küçük bir alanı kaplayacaktır. Bu durumda parametreler yeterli hassasiyetle hesaplanamayacaktır. Bu çalışmada kullanılan kamera ve tarayıcının görüş açıları birbirine uyumludur. Sonuç olarak kamera görüntüleri hesaplanan dış parametrelerle birlikte nokta bulutlarının birleştirilmesinde, fotoğraftan nokta bulutuna doku kaplamada ve nokta bulutlarının renklendirilmesinde kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- Akca, D., Gruen, A., Alkis, Z., Demir, N., Breuckmann, B., Erduyan, I., and Nadir, E., 2006, **3D modeling of the Weary Herakles Statue with a Coded Structured Light System**. ISPRS Commission V Symposium, Dresden, September 25-27. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XXXVI, part 5, pp. 14-19.
- Akca, D., 2003, **Full Automatic Registration of Laser Scanner Point Clouds**, Optical 3-D Measurement Techniques VI. Zurich, Switzerland, September 22-25, vol. 1, 330-337.
- Altuntas, C., Pfeifer, N., Yıldız, F., 2010, **Estimation of Exterior Parameters of Sensor Combination for Efficient 3d Modeling**, ISPRS Commission V Mid-Term Symposium, 22-24 June, Newcastle Upon Tyne, UK.
- Altuntaş, C., Yıldız, F., 2008, **Yersel Lazer Tarayıcı Ölçme Prensipleri ve Nokta Bulutlarının Birleştirilmesi**, hkm Jeodezi, Jeoinformasyon ve Arazi Yönetimi Dergisi. 2008/1, Sayı 98, 20-27.
- Al-Manasir, K., Fraser, C.S., 2006a, **Registration of Terrestrial Laser Scanner Data Using Imagery**, The Photogrammetric Record. 21(115), 255-268.
- Al-MANasir, K., Fraser, C.S., 2006b, **Automatic Registration of Terrestrial Laser Scanner Data via Imagery**, IAPRS, 36(5), Dresden, Septembr, 25-27.
- Aquitera, D.G., Gonzalvez, P.R. and Lahoz, J.G., 2009, **An Automatic Procedure for Co-registration of Terrestrial Laser Scanners and Digital Cameras**, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 64(2009): 308-316.
- Barnea, S., Filin, S. 2007, **Registration of Terrestrial Laser Scans via Image Based Features**, ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007. Espoo, Finland, September 12-14, 32-37.
- Besl, P.J., McKay, N.D., 1992, **A Method for Registration of 3-D Shapes**, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 14(2), 239-256.
- Briese, C., Pfeifer, N., 2008, **Line Based Reconstruction from Terrestrial Laser Scanning Data**, Journal of Applied Geodesy. 2(2008), 85-95.
- Chen, Y., Medioni, G., 1992, **Object Modelling by Registration of Multiple Range Images**, Image and Vision Computing. 10(3), 145-155.
- Cronk, S., Fraser, C., Hanley, H., 2006, **Automated Metric Calibration of Colour Digital Cameras**, The Photogrammetric Record. 21(116), 355-372.
- Dold, C., Brenner, C., 2006, **Registration of Terrestrial Laser Scanning Data Using Planar Patches and Image Data**, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (IAPRS). 36(5), Dresden, 78-83.
- El-Hakim S.F., Beraldin, J.A., Picard, M., Godin, G., 2004, **Detailed 3D Reconstruction of Large-Scale Heritage Sites with Integrated Techniques**, IEEE Computer Graphics & Applications, 24(3), 21-29.
- El-Hakim, S.F., Beraldin, J.A., Godin, G., Boulanger, P., 1996, **Two 3-D Sensors for Environment Modeling and Virtual Reality: Calibration and Multi-view Registratio**, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (IAPRS). 38(B5), Vienna, Austria, 9-19 July, 140-146.

- Fischler, M.A., Bolles, R.C., 1981, **Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography**, Communications Association and Computing Machine. 24(6), 381-395.
- Forkuo, E. K., 2005, **Automatic Fusion of Photogrammetric Imagery and Laser Scanner Point Clouds**, Ph.D. Thesis, The Hong Kong Polytechnic University. 213 pages.
- Forkuo, E.K., King, B.A., 2004, **Automatic Fusion of Photogrammetric Imagery and Laser Scanner Point Clouds**, XXth ISPRS Congress, Commission IV, 12-23 July, Istanbul, pp. 921-926.
- Förstner, W., Gülch, E., 1987, **A fast Operator for Detection and Precise Location of Distinct Points, Corners and Centers of Circular Features**, In Proceedings of ISPRS Intercommission Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data, Interlaken, pp.281-305.
- Gruen, A., Akca, D., 2005, **Least Squares 3D Surface and Curve Matching**, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 59(2005): 151-174.
- Harris, C., Stephens, M., 1988, **A Combined Corner and Edge Detector**, Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference. Manchester, UK, 147-151.
- Kraus, K., 2007, **Photogrammetry: Geometry From Images and Laser Scans**, Walter de Gruyter. Berlin, New York, 10-24.
- Karel, W., Pfeifer, N., 2009, **Range Camera Calibration Based on Image Sequences and Dense, Comprehensive Error Statistics**, Proceedings of the SPIE. Volume 7239, pp. 72390D-72390D-12.
- Lambers, K., Eisenbeises, H., Sauerbier, M., Kupferschmidt, D., Gaisecker, T., Sotoodeh, S., Hanusch, T., 2007, **Combining Photogrammetry and Laser Scanning for the Recording and Modelling of the Late Intermediate Period Site of Pinchango Alto, Palpa, Peru**, Journal of Archaeological Science. 34 (2007), 1702-1712.
- Lowe, D. G., 2004, **Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints**, International Journal of Computer Vision. 60(2), 91-110.
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., Harley, I., 2007, **Close Range Photogrammetry: Principles, Techniques and Applications**, Wiley Whittles, Scotland, UK, 116-122.
- Pfeifer, N., Briese, C., 2007, **Geometrical Aspects of Airborn Laser Scanning and Terrestrial Laser Scanning**, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (IAPRS). 36(3/W52), Espoo, Finland, 311-319.
- Scaioni, M., 2002, **Independent Model Triangulation of Terrestrial Laser Scanner Data**, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (IAPRS). 34(5/W12), 308-313.
- Schueremans, L., Genechten, B.V., 2009, **The Use of 3D Laser Scanning in Assessing Safety of Masonry Vaults-A Case Study on the Church of Saint-Jacobs**, Optics and Lasers in Engineering, 47(2009), 329-335.
- Tsakiri, M., Lichti, D., Pfeifer, N., 2006, **Terrestrial Laser Scanning for Deformation Monitoring**, 12th FIG Symposium, Baden, May 22-24.
- Wendt, A., Dold, C., 2005, **Estimation of Interior Orientation and Eccentricity Parameters of a Hybrid Imaging and Laser Scanning Sensor**, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (IAPRS). 36(5/W8), Berlin, pp. on CD.
- Yastikli, N., 2007, **Documentation of Cultural Heritage using Digital Photogrammetry and Laser Scanner**, Journal of Cultural Heritage, 8(2007), 423-427.
- Zhang, Z., 1994, **Iterative Point Matching for Registration of Free-Form Curves and Surfaces**, International Journal of Computer Vision. 13(2), 119-152.