

# CİSİMLERİN VE YÜZEYLERİN 3B MODELLEMELERİ İÇİN LAZER TARAYICI VE DİJİTAL KAMERA BİRLEŞİMİ

Cihan ALTUNTAŞ, Ferruh YILDIZ

Selçuk Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 42075, Selçuklu, Konya  
[altuntas@selcuk.edu.tr](mailto:altuntas@selcuk.edu.tr), [fyildiz@selcuk.edu.tr](mailto:fyildiz@selcuk.edu.tr)

**Anahtar kelimeler:** Lazer tarayıcı, Dijital kamera, Sensor birleşimi, Kamera konum parametreleri

## ABSTRACT:

Lazer tarayıcı ölçüleri pek çok uygulamada fotogrametrik verilerle birlikte kullanılmaktadır. Bu nedenle lazer tarayıcılarda entegre dijital kamera bulunmasına rağmen daha iyi sonuçlar alabilmek için lazer tarayıcılara yüksek çözünürlüklü kameralar takılmaktadır. Yüksek çözünürlüklü kamera görüntüleri lazer tarayıcı nokta bulutlarının birleştirilmesinde, renklendirilmesinde ve doku kaplanmasında kullanılmaktadır. Bu çalışmada yersel lazer tarayıcı üzerine yüksek çözünürlüklü kamera takılarak lazer tarayıcı koordinat sistemine göre kamera konum parametreleri (KKP) hesaplanmıştır. Ayrıca, hesaplanan KKP kullanılarak lazer tarama verileri yüksek çözünürlüklü kamera görüntüsü ile renklendirilmiştir.

## 1. GİRİŞ

3 boyutlu (3B) konum bilgisi (xyz) ölçmek ve modellemek için geleneksel yöntemlerle birlikte fotogrametri yöntemi uzun yıllardır kullanılmaktadır. Bununla birlikte, teknolojik gelişmelere paralel olarak ortaya çıkan lazer tarama yöntemi yaklaşık yirmi yıldan beri 3B konum bilgisi ölçme ve modellemede yaygın olarak kullanılır hale gelmiştir. Lazer tarayıcılar bugüne kadar tarihi ve kültürel eserlerin modellenmesi, mimari planlama, sanal gerçeklik uygulamaları, deformasyon ölçmeleri gibi pek çok mühendislik uygulamasında kullanılmıştır ve popüleritesi her geçen gün artmaktadır. Lazer tarayıcılar noktaların konumunu ve yansıma değerini ölçerek kaydetmektedirler. Tarayıcı ile birlikte kullanılan kamera görüntülerinden ölçülen noktalara renk değeri de atanabilmektedir. Yöntemin en önemli özelliği istenilen aralıklarla ve çok kısa sürede objeye ait konum bilgilerinin ölçülerek cismin geometrik şeklinin nokta bulutu olarak görüntülenebilmesidir. Ancak lazer tarayıcılar 3B modelleme uygulamaları için tek başına yeterli değildir, pek çok uygulamada lazer tarama verileri fotogrametrik verilerle birlikte kullanılmaktadır. Lazer tarayıcıların çoğunda entegre kamera bulunmaktadır ancak, 3B modellemede daha iyi sonuçlar elde edebilmek için lazer tarayıcılar yüksek çözünürlüklü kameralarla birlikte kullanılmaktadır. Bu nedenle lazer tarayıcılara yüksek çözünürlüklü dijital kamera takılmakta ve 3B modellemede nokta bulutu görüntüleri ile fotoğraflar birlikte kullanılmaktadır. Fotoğraflar nokta bulutlarının birleştirilmesi, renklendirilmesi ve nokta bulutuna fotoğraf dokusu kaplanması için kullanılmaktadır. Literatürde tarayıcıya monte kameradan alınan fotoğraflarla nokta bulutları birleştirilmiş ve uygulamada en çok kullanılan iteratif en yakın nokta (İEYN) yönteminden daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Diğer yandan, nokta bulutu görüntüsünün daha anlaşılır hale getirilmesi için nokta bulutları renklendirilmektedir. Ancak tarayıcının entegre kamerası ile renklendirilen nokta bulutunun görüntüsü her zaman istenilen netlikte olamamaktadır. Bu durumda nokta bulutu görüntüsünün iyileştirilmesi gerekir. Nokta bulutunun görünümü yüksek çözünürlüklü harici kamera görüntüsü ile yeniden renklendirilerek iyileştirilebilir. 3B modellemede diğer bir adım nokta bulutu üzerine fotoğraf dokusu kaplanmasıdır. Fotoğraf dokusu kaplanmasında ise en önemli adım kamera izdüşüm merkezi koordinatlarının hesaplanmasıdır. İzdüşüm merkezi koordinatları cisim ve resim koordinatları bilinen kontrol noktaları ile hesaplanmaktadır. Lazer tarayıcıya takılan kameranın tarayıcı koordinat sistemindeki konumu kamera

konum parametreleri (KKP) ile hassas olarak bilindiğinden kontrol noktasına gerek kalmadan fotoğraflar doğrudan nokta bulutu üzerine kaplanabilmektedir.

Lazer tarayıcı ve kamera birleşiminde, nokta bulutu ve fotoğrafın birlikte kullanılabilmesi için öncelikle lazer tarayıcı koordinat sistemine göre KKP'nin hesaplanması gerekir. KKP aynı zamanda lazer tarayıcı ve kamera koordinat sistemleri arasındaki dönüşüm parametrelerini ifade etmektedir. KKP'nin hesabı için literatürde farklı yöntemler kullanılmıştır.

El-Hakim ve ark.(1996) da lazer tarayıcının kalibrasyonu için duvar üzerinde özel bir test alanı oluşturulmuş ve test alanında kontrol noktaları tesis edilmiştir. Nokta bulutlarının birleştirilmesinde lazer tarayıcı ölçülerinin yansıma değerleri ve tarayıcıya takılan kamera görüntüleri birlikte kullanılmıştır. Kamera ve tarayıcı koordinat sistemleri arasındaki dönüşüm parametreleri hesaplanmış ve nokta bulutları kamera görüntülerinin fotogrametrik değerlendirmesi ile birleştirilmiştir. Kameranın tarayıcı koordinat sistemindeki konumunun her lazer taramasında yeniden hesaplanmanın pratik olmadığı parametrelerin bir kez hassas olarak hesaplandıktan sonra tüm lazer taramalarında aynı parametrelerin kullanılabilceği gösterilmiştir.

Wendt ve Dold (2005) de noktaların aynı düzlemde yer almadığı özel bir test alanı oluşturulmuştur. Bu test alanı kullanılarak kamera kalibrasyonu ve KKP hesabının birlikte ve ayrı yapılması durumunda elde edilen sonuçlar verilmiştir. Kamera kalibrasyonunun lazer tarayıcı ve kamera birleşiminde KKP'nin hesaplanmasında en önemli etken olduğu gösterilmiştir. Kontrol noktalarının uygun seçilmesi durumunda kamera kalibrasyonu ve KKP hesabının birlikte yapılabileceği gösterilmiştir.

Forkuo ve King (2004) de özel bir test alanı oluşturulmadan seçilen bir yüzey için yapılan lazer taraması ve kamera görüntüsü kullanılarak KKP hesaplanmıştır. Lazer tarayıcı nokta bulutundan 2B yansıma görüntüsü (intensity image) oluşturularak, bu görüntü ile kamera görüntüsü arasında kenar çıkarma operatörü ile eşlenik detay noktaları tespit edilmiştir. 2B yansıma görüntüsü yardımıyla bu noktalara karşılık gelen lazer tarayıcı koordinatları hesaplanmış ve ışın demetleri dengelemesi ile kameranın konumu iteratif olarak hesaplanmıştır. Parametreler 2 piksel karesel ortalama hata ile elde edilmiştir.

Al-Manasir ve Fraser (2006) in çalışmasında Riegl LMS-Z210 TLS üzerine Nikon D100 kamera monte edilmiş ve KKP'nin hesaplanmasında duvarda oluşturulan test alanı kullanılmıştır. Kamera kalibrasyonu, parametre hesabından önce test alanının 14 fotoğrafı ve 160 kontrol noktası kullanılarak 0.05 piksel hassasiyetle yapılmıştır. KKP'nin hesabı için test alanı tek bir durak noktasından taranmış ve aynı anda tarayıcı üzerindeki kamera ile fotoğrafı çekilmiştir. Test alanı üzerinde işaretlenen 79 noktada doğrusalılık koşulu ile KKP hesaplanmıştır.

Aquileta ve ark.(2009) da, lazer tarayıcı koordinat sistemine göre kamera konumunun hesaplanması için dijital kamera görüntüsü ve lazer tarayıcı ölçülerinden elde edilen 2B mesafe görüntüsü (range image) birlikte kullanılmıştır. Dijital kamera görüntüsü yalnızca piksel koordinatlı bir görüntü iken, mesafe görüntüsü piksel koordinatlarıyla birlikte 3B lazer tarayıcı koordinatlarına da sahiptir. Hesaplama için herhangi bir test alanı oluşturulmamış seçilen bir obje için yapılan lazer taraması ve dijital görüntü kullanılmıştır. Önce her iki fotoğraf aynı boyuta getirilmiş daha sonra bu fotoğraflardan Förstner operatörü (Förstner ve Gülch, 1987) ile detaylar çıkarılarak korelasyonlu olarak eşleştirilmiştir. RANSAC (Fischler ve Bolles, 1981) yöntemiyle dijital görüntüdeki piksel koordinatları ve mesafe görüntüsünün lazer tarayıcı koordinatları eşleştirilerek doğrusalılık koşulu ile parametreler hesaplanmıştır. Noktaların eşleşme durumu analiz edilerek (Sampson hata analizi) hatalı eşleşmiş noktalar hesaplama dışı bırakılmış ve kalan noktalarla lazer tarayıcı koordinat sisteminde kamera konumu hesaplanmıştır. Parametreler 50mm ve 20mm nokta sıklığı ile yapılan iki tarama ölçüsü için sırasıyla 1.1 ve 2.1 piksel hassasiyetle hesaplanmıştır. Öteleme parametrelerinin hassasiyetleri ise 3 cm ve 1cm olarak elde edilmiştir.

Altuntas ve ark.(2010a) ve Altuntas ve ark.(2010b) de Nikon P50 kamerası Ilris 3D tarayıcısı üzerine monte edilmiş ve KKP 0.34 piksel (0.58 mikron) hassasiyetle hesaplanmıştır. Her bir parametrenin karesel ortalama hatası ise;  $m_x=0.1\text{mm}$ ,  $m_y=0.8\text{mm}$ ,  $m_z=0.9\text{mm}$ ,  $m_\phi=1.85''$ ,  $m_\theta=1.56''$ ,  $m_\kappa=0.30''$  olarak hesaplanmıştır.

Bu çalışmada Ilris 3D lazer tarayıcısı üzerine Nikon D80 fotoğraf makinesi takılmış ve oluşturulan test alanı ile KKP hesaplanmıştır. Daha sonra KKP kullanılarak lazer tarayıcı ölçüleri kameradan alınan yüksek çözünürlüklü fotoğraf ile renklendirilmiştir.

## 2. YÖNTEM

KKP'nin ( $\omega, \phi, \kappa, X_c, Y_c, Z_c$ ) hesaplanabilmesi için kamera kalibrasyon parametrelerinin bilinmesi gerekir. Kamera kalibrasyonu ve parametre hesabı birlikte de yapılabilir, ancak bunun için kontrol noktalarının aynı düzlemde yer almadığı bir test alanı oluşturulmalıdır. Bu çalışmada kamera kalibrasyonu, KKP'nin hesabından önce ayrı olarak yapılmıştır. Kamera kalibrasyonu için PI3000 kamera kalibrasyon yazılımı kullanılmış ve kamera kalibrasyon bilgileri aşağıda verilmiştir.

Odak uzaklığı (c)	: 24.520746mm
Asal nokta $x_0$	: 11.973725mm
Asal nokta $y_0$	: 7.880653mm
Işınal distorsiyon K1	: 0.0001677840
Işınal distorsiyon K2	: -0.000002806006
Teğetsel distorsiyon P1	: -0.00001574003
Teğetsel distorsiyon P2	: 0.000006188080
Piksel boyutu	: 6.1 mikron
Resim boyutları	: 3872 x 2592 piksel

Ditorsiyon değerleri (1) eşitliği (Kraus, 2007) ile hesaplanmış ve x,y koordinatları için distorsiyon değerleri (3) bağıntısı ile hesaplanmıştır.

$$\Delta r = g_{13} \cdot r \cdot (r^2 - r_0^2) + g_{14} \cdot r \cdot (r^4 - r_0^4) \quad (1)$$

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

$$\Delta x = \frac{\Delta r}{r} \cdot x, \quad \Delta y = \frac{\Delta r}{r} \cdot y \quad (3)$$

Burada;

- $\Delta r$  : Işınal distorsiyon
- $g_{13}, g_{14}$  : Işınal distorsiyon katsayıları K1 ve K2
- $r_0$  : 5.253768667 mm ( $r_0$  resmin maksimum yarıçaplı iç çemberinin yaklaşık 2/3 dür (Luhmann ve ark., 2006))
- $r$  : Işınal uzaklık
- $x, y$  : Resim koordinatları
- $\Delta x, \Delta y$  : x, y koordinatları için distorsiyon düzeltmeleridir.

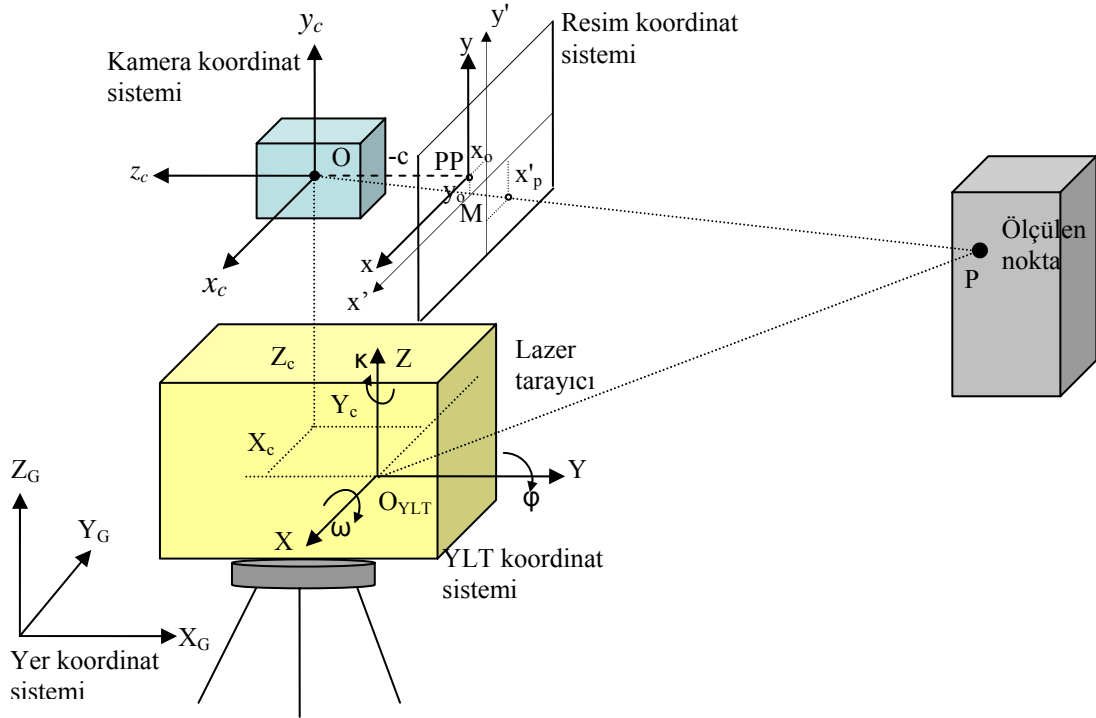
KKP, lazer tarayıcı ve resim koordinatları bilinen en az üç noktada doğrusalılık koşulu ile hesaplanabilir. Ancak sonuçların güvenilirliği ve hassasiyeti için daha fazla nokta ile çözüm yapılmalıdır. KKP'nin hesabı için Selçuk Üniversitesi Fotogrametri Laboratuvarında özel bir test alanı oluşturulmuştur. Bir duvar üzerine  $3 \times 3.6\text{m}^2$  büyüklüğünde bir alanda 20 cm aralıklarla 270 kontrol noktası işaretlenmiştir. Noktalar siyah zemin üzerine 3cm çaplı beyaz noktalar olarak işaretlenmiştir (Şekil 1). Kontrol noktalarının işaretleri lazer nokta bulutundan ve fotoğraftan kolayca seçilebilecek şekilde daire olarak belirlenmiştir.

## 3. KKP'NİN HESABI İÇİN ÖLÇMELER

Kamera özel aleti yardımıyla tarayıcıya sabit olarak takıldıktan sonra lazer tarayıcı test alanından yaklaşık 6m uzakta bir noktaya kurulmuştur (Şekil 1). Bu noktada hem tarayıcıdan hem de kameradan test alanı aynı anda görülebilmektedir ve test alanı fotoğrafın tamamını kaplamaktadır. Test alanı 2mm nokta sıklığı ile taranmış ve tarayıcı üzerindeki kamera ile fotoğrafı çekilmiştir. Test alanından yaklaşık 650000 nokta ölçülmüştür.



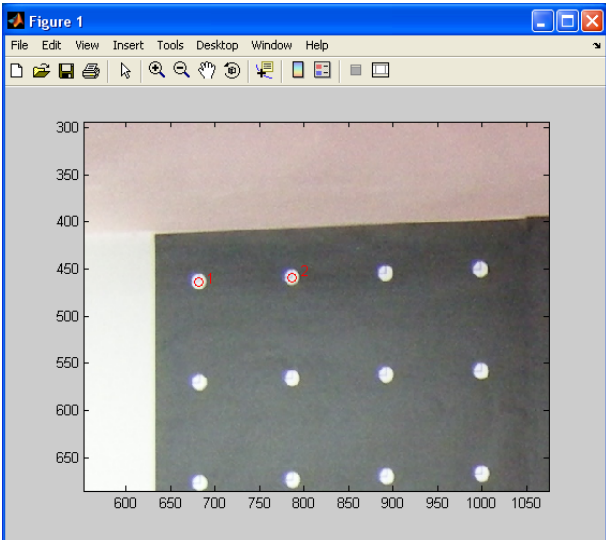
Şekil 1. YLT ve kamera birleşiminde KKP'nin hesaplanması için yapılan ölçmeler. Test alanının lazer tarayıcı ile taranması ve fotoğraf çekimi



Şekil 2. 2B Resim ve 3B lazer tarayıcı koordinat sistemleri ve KKP ( $\omega, \phi, \kappa, X_c, Y_c, Z_c$ )

### 3.1 Kontrol noktalarının resim koordinatları

2B resim koordinat sistemi, başlangıcı izdüşüm merkezi olan 3B kamera koordinat sisteminin  $x, y$  düzlemine paralel bir koordinat sistemidir. Kamera koordinat sisteminin  $x, y$  düzlemi paralel olarak odak uzaklığı kadar kaydırılarak resim düzlemi tanımlanır. Resim koordinat sisteminin başlangıcı ile kamera koordinat sisteminin başlangıçları asal eksen üzerindedir. Resim koordinatları ile kamera koordinat sisteminin  $x, y$  koordinatları aynıdır (Şekil 2).

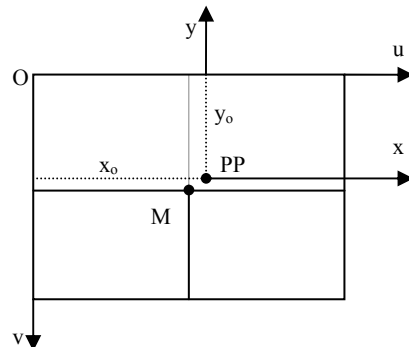


Şekil 3. Kontrol noktalarının resim koordinatlarının okunması

Kontrol noktaları siyah zemin üzerine beyaz olarak işaretlendiği için fotoğraftan kolayca ayırt edilmektedir. Kontrol noktalarının resim koordinatları Matlab yazılımı altında geliştirilen kod ile hedef işaretlerinin tam merkezinden okunmuştur (Şekil 3). Resim üzerinde herhangi bir noktanın konumu piksel

koordinatları ile tanımlanır. Piksel koordinat sistemi başlangıcı resmin sol üst köşesi olan ve  $u, v$  eksenleri ile tanımlanan koordinat sistemidir. Fotogrametride kullanılan resim koordinat sistemi ise başlangıcı asal nokta (Principal Point),  $+x$  eksenini sağ doğru,  $+y$  eksenini yukarı doğru olarak tanımlanan bir koordinat sistemidir. Kamera kalibrasyonunda asal noktanın resim üzerindeki konumu  $u, v$  piksel koordinat sisteminde  $x_0, y_0$  koordinatları ile tanımlanmıştır. Fotogrametrik hesaplamalar için noktaların resim koordinatları (başlangıcı asal nokta olan koordinat sistemi) ile tanımlanması gerekir (Şekil 4). Buna göre kontrol noktalarının piksel koordinatları ile resim koordinatları arasındaki ilişki (4) bağıntısı ile ifade edilir.

$$\begin{aligned} x &= u - x_0 \\ y &= y_0 - v \end{aligned} \quad (4)$$



Şekil 4. Piksel ve resim koordinat sistemleri.  $x, y$ : Resim koordinat sistemi eksenleri,  $u, v$ : Piksel koordinat sistemi eksenleri,  $x_0, y_0$ : Asal nokta koordinatları, PP: Asal nokta, M: Resim orta noktasıdır.

### 3.2 Kontrol noktalarının lazer tarayıcı sisteminde koordinatları

Nokta bulutu üzerinden detay seçimi ve nokta tespiti zor olduğu için kontrol noktalarının lazer tarayıcı koordinatları oluşturulan

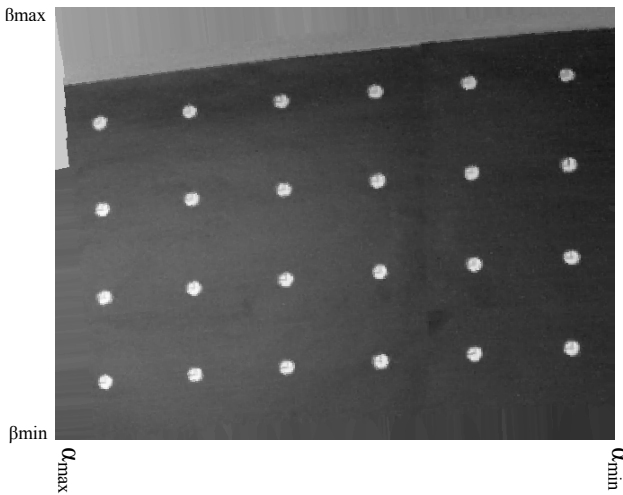
yansımaya görüntüsü (intensity image) üzerinden okunmuştur. Yansıma görüntüsü lazer tarayıcı ölçülerinden ( $\alpha, \beta$  ve  $I$ ) oluşturulan 2B bir görüntüdür. Ölçülen noktaya ait doğrultunun aletinin x eksenine ile yatay düzlemde yaptığı açı  $\alpha$ , xy koordinat düzlemleri ile düşey düzlemde yaptığı açı  $\beta$  dir (Şekil 5). 2B yansıma görüntüsü bu  $\alpha, \beta$  ve yansıma değerleri ( $I$ ) ile oluşturulmuştur (Karel ve Pfeifer, 2009; Deveau ve ark., 2004). Yansıma görüntüsünde her piksel lazer tarayıcı ölçülerinin  $f(\alpha, \beta, I)$  fonksiyonunun bir sonucudur. 2B yansıma görüntüsünün oluşturulmasında işlem sırası şu şekildedir.

- Lazer tarayıcı ölçüsünün  $\alpha$  ve  $\beta$  açılarının maksimum ve minimum değerleri bulunarak oluşturulacak yansıma görüntüsünün sınırları belirlenir.  $\alpha$  açısı sağdan sola doğru,  $\beta$  açısı ise aşağıdan yukarı doğru artmaktadır. Buna göre oluşturulacak 2B görüntüde soldan sağa doğru  $\alpha$  açısı, aşağıdan yukarıya doğru  $\beta$  açısı artmaktadır (Şekil 5).
- Açılar için artış değeri; ortalama 6 metre tarama mesafesi ve 2 milimetre nokta sıklığına karşılık gelen 0.021 grad olarak belirlendi.
- $\alpha, \beta$  ve yansıma ( $I$ ) değerleri ile görüntü pikselleri oluşturuldu.

$$\text{Yansıma Görüntüsü Pikseli} = f(\alpha, \beta, I)$$

Bu şekilde lazer tarama ölçüleri yansıma değerlerine karşılık gelen gri renk tonları ile 2B olarak görüntülenmiş oldu.

Bu görüntü resim formatında kaydedilerek grid değerleri ile birlikte kullanılmaktadır. Görüntü oluşturulurken aynı zamanda x,z koordinatlarından oluşan kareler ağında, y değerleri de enterpole edilerek kaydedilmiştir. Kontrol noktaları yansıma görüntüsü üzerinden mouse ile seçilerek işaretlenmiş, noktaların x,z koordinatları  $\alpha$  ve  $\beta$  değerlerinden hesaplanmış, y koordinat değeri ise x,z kareler ağından hesaplanmıştır. Bu koordinatlar seçilen noktalar için yaklaşık koordinatlar olarak kabul edilmiş ve hedef işaretlerinin çapı (3cm) ve yansıma ( $I$ ) değerleri ölçüt olarak belirlenip kontrol noktalarının lazer tarayıcı koordinatları hedef işaretlerinin tam orta nokta noktası olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5. Test alanının lazer tarama ölçüsünden oluşturulan 2B yansıma görüntüsü (intensity image)

#### 4. KKP'NİN HESAPLANMASI

Doğrusallık koşulu cisim noktası, resim noktası ve izdüşüm merkezinin aynı doğru üzerinde olmasını ifade eder. Lazer tarayıcı ve kamera birleşiminde obje noktasının koordinatları lazer tarayıcı ile ölçülmektedir. Resim ve lazer tarayıcı

koordinat sistemleri arasındaki ilişki Şekil 2 de görülmektedir. KKP, test noktalarının lazer tarayıcı ve resim koordinatları arasındaki doğrusallık koşulu ile hesaplanır.

Distorsiyon hatası da dikkate alındığında resim ve tarayıcı koordinatları arasındaki ilişki (5) bağıntısı ile ifade edilir (Şekil 2). Bu bağıntıdan hareketle doğrusallık koşulu eşitlikleri (6) elde edilir (Kraus, 2007).

$$\begin{bmatrix} x - x_o \\ y - y_o \\ -c \end{bmatrix}_{\text{Resim}} = \frac{1}{\lambda} \cdot \mathbf{R}^T \cdot \left( \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{YLT}} - \begin{bmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

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

$$y = y_o - c \frac{r_{12}(X - X_c) + r_{22}(Y - Y_c) + r_{32}(Z - Z_c)}{r_{13}(X - X_c) + r_{23}(Y - Y_c) + r_{33}(Z - Z_c)} + \Delta y \quad (6)$$

Burada;

- $x, y$  : Resim koordinatları
- $x_o, y_o$  : 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
- $\lambda$  : Ölçek katsayısı
- $\mathbf{R}_{\omega\phi\kappa}$  : 3x3 boyutlu ortogonal dönme matrisi
- $\omega, \phi, \kappa$  : Kamera koordinat sisteminin tarayıcı koordinat sistemine göre dönme açıları
- $\Delta x, \Delta y$  : Işımsal distorsiyon düzeltmeleridir.
- $\mathbf{R}$  matrisi elemanları (7) ve (8) eşitlikleri ile verilmiştir.

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \phi \cdot \cos \kappa & -\cos \phi \cdot \sin \kappa & \sin \phi \\ \cos \omega \cdot \sin \kappa + \sin \omega \cdot \sin \phi \cdot \cos \kappa & \cos \omega \cdot \cos \kappa - \sin \omega \cdot \sin \phi \cdot \sin \kappa & -\sin \omega \cdot \cos \phi \\ \sin \omega \cdot \sin \kappa - \cos \omega \cdot \sin \phi \cdot \cos \kappa & \sin \omega \cdot \cos \kappa + \cos \omega \cdot \sin \phi \cdot \sin \kappa & \cos \omega \cdot \cos \phi \end{bmatrix} \quad (8)$$

Doğrusallık koşulunun bilinmeyenlere göre türevi alınarak lineer hale getirilir ve hata denklemleri (9) kurulur. Her resim noktası için iki adet hata denklemi yazılır.

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

$$v_y = \frac{\partial y}{\partial X_c} dX_c + \frac{\partial y}{\partial Y_c} dY_c + \frac{\partial y}{\partial Z_c} dZ_c + \frac{\partial y}{\partial \omega} d\omega + \frac{\partial y}{\partial \phi} d\phi + \frac{\partial y}{\partial \kappa} d\kappa - (y - y^o) \quad (9)$$

İteratif hesaplama için bilinmeyenlerin ilk yaklaşık değerleri gereklidir. Bilinmeyenlerin ilk başlangıç değerleri tarayıcının kamera üzerindeki konumuna göre yaklaşık olarak belirlenmiş ve aşağıdaki değerler alınmıştır.

$$\begin{aligned} X_c &= 0 \text{ m} \\ Y_c &= 0 \text{ m} \\ Z_c &= 0.20 \text{ m} \\ \omega &= 100 \text{ grad} \\ \phi &= 0 \text{ grad} \\ \kappa &= 0 \text{ grad} \end{aligned}$$

Her iterasyonda bilinmeyenler için hesaplanan değerler bir sonraki iterasyon için yaklaşık değerler olarak alınarak birkaç iterasyon sonunda KKP  $m_0 = 0.53$  piksel (3.23 mikron) karesel

ortalama hata ile hesaplanmıştır. Parametreleri daha yüksek hassasiyetle hesaplamak için düzeltmeleri 0.50 piksel den büyük olan noktalar atılarak KKP 124 nokta ile  $m_0=0.27$  piksel (1.65 mikron) karesel ortalama hata ile hesaplanmıştır. Hesaplanan parametreler ve karesel ortalama hataları Tablo 1 de verilmiştir (Altuntaş, 2011).

**Tablo 1.** Resim çekme makinesinin lazer tarayıcı koordinat sistemine göre kamera konum parametreleri (KKP) ve karesel ortalama hataları

	Parametreler	$m_0$
$X_c(m)$	-0.009073	0.000632
$Y_c(m)$	0.069432	0.000118
$Z_c(m)$	0.352643	0.000768
$\omega(\text{grad})$	99.873599	0.000148
$\varphi(\text{grad})$	0.251849	0.000120
$\kappa(\text{grad})$	0.006490	0.000023

## 5. KKP'NİN KONTROLÜ

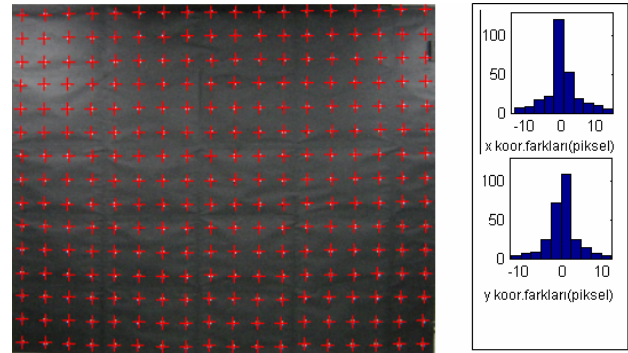
### 5.1 Kontrol-1: Kontrol noktalarına ait resim koordinatlarının hesaplanması

KKP kullanılarak doğrusallık bağıntısı (6) ile kontrol noktalarının lazer tarayıcı koordinatlarından resim koordinatları hesaplandı ve bilinen resim koordinatları ile karşılaştırıldı. Kontrol noktalarının hesaplanan koordinatlarıyla resimdeki görüntüsünün çakışma durumu Şekil 6 da görülmektedir. Kontrol noktalarının bilinen ve hesaplanan resim koordinatları arasındaki farklar hesaplanarak bu farklar istatistiksel olarak test edilmiş ve ölçüleri etkileyecek anlamlı fark olmadığı görülmüştür. Kontrol noktalarının bilinen resim koordinatları ile hesaplanan resim koordinatları arasındaki ortalama farklar x ve y koordinatları için sırasıyla 0.32 piksel ve 0.02 piksel olarak elde edilmiştir. Resim koordinatları KKP ile hesaplandığından bu kontrol, parametrelerin doğru olduğunu göstermektedir.

### 5.2 Kontrol-2: Lazer tarama noktalarının fotoğraf renkleri ve yansıma değerleri ile görüntülenmesi

Bu kontrolde bütün lazer tarama noktalarına kamera ile alınan fotoğraftan renk ataması yapıldı. Yani noktalar takılan harici kamera görüntüsü ile yeniden renklendirildi. KKP 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 3 boyutlu olarak görüntülenerek noktaların kamera fotoğrafından alınan renkleri ve yansıma değerleri ile oluşturulan görüntüleri karşılaştırıldı ve benzer görüntüler elde edildi (Şekil 7). Fotoğrafta tarayıcı noktalarına karşılık gelen renkler KKP ile hesaplandığından bu işlem hesaplanan parametrelerin kontrolüdür.



**Şekil 6.** Kontrol noktalarının lazer tarayıcı koordinatlarından hesaplanan resim koordinatları ve resimdeki görüntüsü ile çakışma durumu. Sağda hesaplanan ve bilinen resim koordinatları arasındaki farkların grafiği

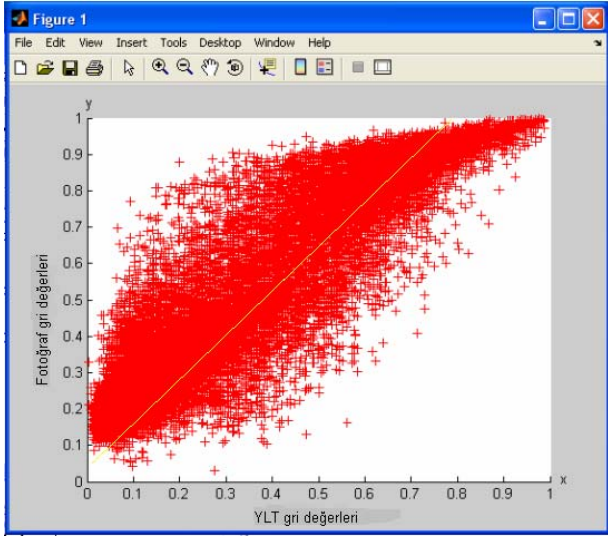


**Şekil 7.** Lazer tarama noktalarının kamera renkleri (solda) ve yansıma değerleri ile görüntüsü (sağda).



### 5.3 Kontrol-3: Yansımaya değerleri ve fotoğraf renkleri grafiği

Bu kontrolde fotoğrafın renk değerleri ile lazer tarayıcının yansımaya değerleri karşılaştırıldı. Bunun için taranan bütün noktaların fotoğraf renkleri (Nikon D80) ve yansımaya değerleri (Ilris 3D) bir grafik üzerinde görüntüldü (Şekil 8). Lazer tarama noktalarının doğrusalılık koşulu ile resim koordinatları hesaplandı ve bu noktanın rengi (RGB) lazer tarama noktasının rengi olarak alındı. Fotoğraf renklerini grafikte gösterebilmek için RGB değerlerine karşılık gelen gri ton değerleri hesaplandı.



Şekil 8. Yansımaya değerleri ve fotoğraf renkleri grafiği. Grafikte 0 değeri siyaha 1 beyaza karşılık gelmektedir.

Normal şartlarda parametreler hatasız, lazer tarayıcı yansımaya değerleri tüm yüzeyde homojen ve ışık şiddetinin lazer tarama ve fotoğraf çekiminde değişmediği kabul edilirse grafikte noktaların 45 derece eğimli bir doğru üzerinde olması gerekir. Ancak lazer tarayıcıların kaydettiği yansımaya değeri yüzeyin yapısına, lazer ışınının yüzeye geliş açısına ve parlaklık durumuna göre değişmektedir. Aynı şekilde fotoğraf alımı ve lazer taraması sırasında ışık miktarında da değişme olmaktadır. Bütün bunlar dikkate alındığında grafikte noktaların dağılımı tam bir doğru değil, doğruya yakın bir dağılımda olacaktır. Şekilde ki grafikte noktalar arasındaki korelasyon 0.90'dır. Eğer parametreler hatalı olsaydı grafikte noktalar gelişigüzel dağılırdı. Grafikte çok az sayıda oluşan dağınık noktalar resim çekiminde oluşan ışın yansımalarından ve yukarıda bahsedilen etkilerde kaynaklanmaktadır ve KKP'nin hassasiyeti ile ilişkisi yoktur.

### 6. NOKTA BULUTLARININ RENKLENDİRİLMESİ

Bu uygulamada lazer tarayıcı noktalarına tarayıcıya takılan Nikon D80 kamera görüntüsünden renk değeri atanarak noktalar renklendirilmiştir. Kampus camii için yapılan bir lazer taraması tarayıcı üzerindeki kamera ile alınan fotoğraflarla renklendirilmiştir. KKP kullanılarak doğrusalılık eşitlikleri (6) ile tarama noktasının resim koordinatları hesaplanmış ve bu pikselin rengi tarama noktasının rengi olarak kaydedilmiştir. Noktanın resim üzerindeki yeri için distorsiyon düzeltilmesi de ters işaretli olarak koordinatlara eklenmiştir. Sonuçta daha iyi renklendirilmiş nokta bulutu görüntüsü elde edilmiştir (Şekil 9).

### 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Ilris 3D lazer tarayıcısı üzerine Nikon D80 kamera takılması ve lazer tarayıcı koordinat sistemine göre KKP

0.27 piksel (1.65 mikron) karesel ortalama hata ile hesaplanmıştır. Her parametrenin karesel ortalama hataları da hesaplanmış ve parametrelerin yüksek hassasiyetle hesaplandığı görülmüştür. Ayrıca üç farklı kontrol yöntemi ile KKP'nin hesap kontrolü yapılmıştır. Bu kontrollerden elde edilen sonuçlar da parametrelerin yüksek hassasiyetle hesaplandığını göstermektedir.

Lazer tarayıcı ve kamera birleşiminde dikkat edilecek konulardan birisi de lazer tarayıcı ve kameranın görüş açılarının uyumlu olmasıdır. Yani durulan noktadan bakıldığında hem kameradan hem de tarayıcıdan aynı büyüklükte alanlar görüntülenebilmelidir. Eğer kameranın görüş açısı tarayıcının görüş açısından çok büyük olursa tarama alanı fotoğrafta küçük bir alan kaplayacağı için KKP doğru olarak hesaplanamayacaktır. Buradan hareketle Ilris 3D yersel lazer tarayıcı ve Nikon D80 kamera birleşimi uygun bir sensör birleşimidir.

KKP kullanılarak lazer tarayıcı nokta bulutları takılan kamera görüntüsü ile renklendirilmiştir. Nikon D80 kamera görüntüsü ile renklendirilen nokta bulutu görüntüsü tarayıcının dahili kamerası ile renklendirilen nokta bulutu görüntüsünden daha iyidir ve detaylar daha kolay seçilebilmektedir.

Sonuç olarak; 3B modelleme uygulamalarında lazer tarayıcıların farklı özellikte digital kameralarla birlikte kullanılması gerekebilir. Bu durumda KKP hassas olarak hesaplanmalı ve hesap kontrolleri yapılmalıdır. Hesaplama yapılacak kontrol noktaları tarama alanına homojen olarak dağılmalıdır.

### BİLDİRİM

Bu yayın Cihan Altuntaş'ın Doktora Tezinden yapılmıştır.

### KAYNAKLAR

Altuntaş, C., Pfeifer, N. and Yıldız, F., 2010a, Estimation of exterior parameters of sensor combination for efficient 3d modeling, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (IAPRS)*, (38/5), Newcastle Upon Tyne, 22-24 June, UK, 23-28.

Altuntaş, C., Pfeifer, N., Ressel, C. ve Yıldız, F., 2010b, Lazer tarayıcılara kamera takılması ve tarayıcı koordinatlarına göre kamera konumunun hesaplanması, *Harita Dergisi*, Sayı 144, 64-72.

Altuntaş, C., 2011. Yersel lazer tarayıcı nokta bulutlarının fotogrametrik verilerle birlikte değerlendirilmesi üzerine bir çalışma, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2011, 84 sayfa.

Al-Manasir, K. and Fraser, C.S., 2006, Registration of terrestrial laser scanner data using imagery, *The Photogrammetric Record*, 21(115), 255-268.

Aquilera, D.G., Gonzalez, 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.

Deveau, M., Deseilligny, M.P., Pappadimitris, N. and Chen, X., 2004, Relative laser scanner and image pose estimation from points and segments, *The International Archives of the*

*Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (IAPRS)*, 35(B/3), Istanbul, 1130-1135

El-Hakim, S.F., Beraldin, J.A., Godin, G. and Boulanger, P., 1996, Two 3-d sensors for environment modeling and virtual reality: calibration and multi-view registration, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (IAPRS)*, 38(B5), Vienna, Austria, 9-19 July, 140-146.

Fischler, M.A. and 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. and King, B.A., 2004, Automatic Fusion of photogrammetric imagery and laser scanner point clouds, proceedings, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (IAPRS), Commission IV, XXth ISPRS Congress, Istanbul, 12-23 July*, 921-926.

Förstner, W. and Gülch, E., 1987, A fast operator for detection and precise location of distinct points, corners and centers of

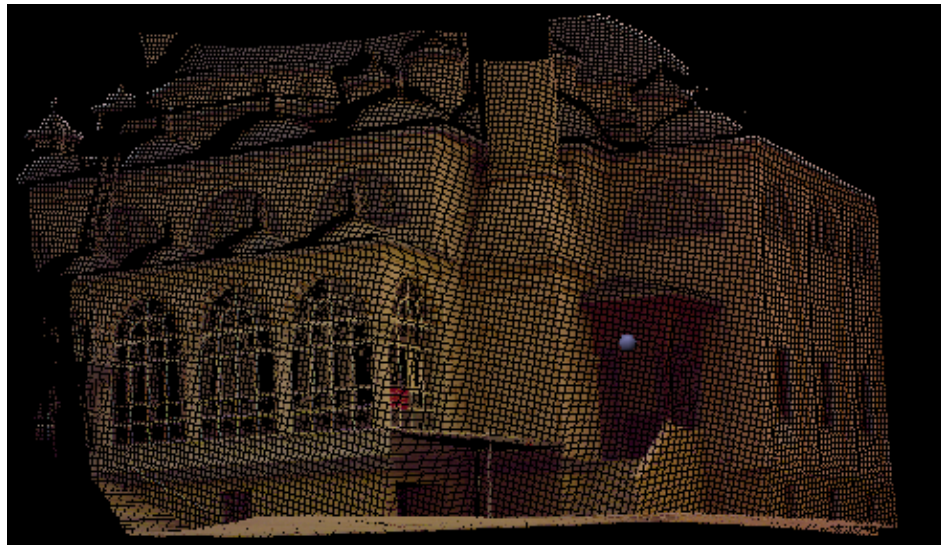
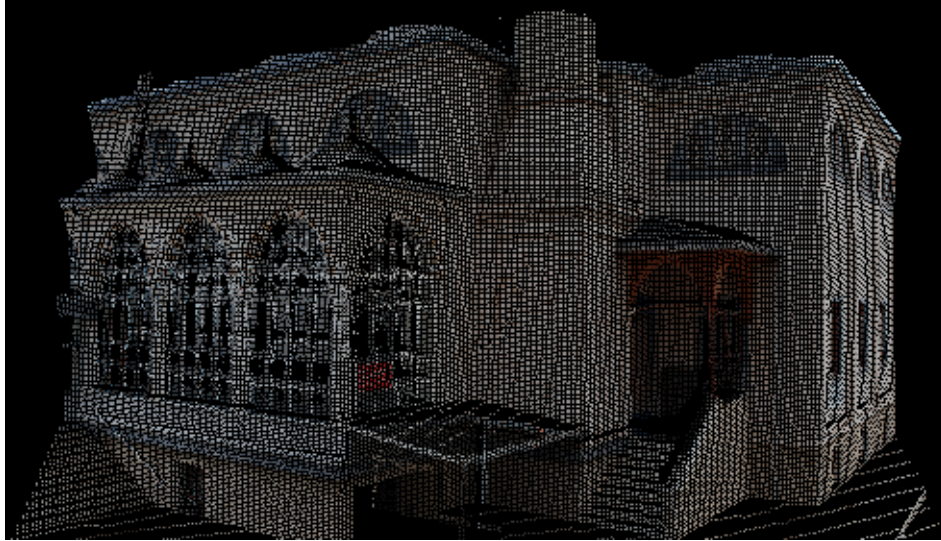
circular features, *In Proceedings of ISPRS Intercommission Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data*, Interlaken, 281-305.

Kraus, K., 2007, *Photogrammetry: geometry from images and laser scans, 2nd ed. Walter de Gruyter*, Berlin, New York, 459 pages.

Karel, W. and 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.

Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S. and Harley, I., 2006, *Close range photogrammetry: principles, techniques and applications, Wiley Whittles*, Scotland, UK, 510 pages.

Wendt, A. and Dold, C., 2005, Estimation of interior orientation and eccentricity parameters of a hybrid imaging and laser scanning sensor, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (IAPRS)*, 36(5/W8), Berlin, in CD-Rom.



**Şekil 9.** Kampus cami lazer taramasında Nikon D80 kamerası ile renklendirilmiş nokta bulutu (üstte) ve lazer tarayıcının dahili kamerası ile renklendirilmiş nokta bulutu (altta) görüntüsü. Nikon D80 kamerasının fotoğrafı ile renklendirilen nokta bulutunda detaylar daha kolay seçilebilmektedir