



T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YERSEL LAZER TARAYICI NOKTA BULUTLARININ FOTOGRAMETRİK VERİLERLE BİRLİKTE DEĞERLENDİRİLMESİ ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA

Cihan ALTUNTAŞ

DOKTORA TEZİ
HARİTA MÜHENDİSLİĞİ Anabilim Dalı

Ocak-2011
KONYA

Her Hakkı Saklıdır

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all materials and results that are not original to this work.

Cihan ALTUNTAŞ
14.01.2011

ÖZET

DOKTORA TEZİ

YERSEL LAZER TARAYICI NOKTA BULUTLARININ FOTOGRAMETRİK VERİLERLE BİRLİKTE DEĞERLENDİRİLMESİ ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA

Cihan ALTUNTAŞ

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ferruh YILDIZ

2011, 74 Sayfa

Jüri
Prof. Dr. Ferruh YILDIZ
Prof.Dr.Şirzat KAHRAMANLI
Prof.Dr.Sıtkı KÜLÜR
Prof.Dr.Hüseyin Gazi BAŞ
Doç.Dr.İ.Öztuğ BİLDİRİCİ

3B konum verisi ölçme ve modellemede kullanılan en son teknik lazer tarama yöntemidir ve obje modelleme, tarihi eserlerin belgelenmesi, kentsel ve mimari planlama, deformasyon ölçmeleri gibi pek çok mühendislik uygulamasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak 3B modelleme uygulamalarında lazer tarama verilerinin yanında fotogrametrik bilgilere de ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle lazer tarayıcılara yüksek çözünürlüklü kamera takılmakta ve birlikte kullanılmaktadır. Tarama alanının konum bilgileri lazer tarayıcı ile ölçülürken doku bilgileri de fotoğraf ile kaydedilmektedir. Kameralar lazer tarayıcılara bütünleşik olabileceği gibi sonradan da takılabilir. Yersel lazer tarama verilerinin işlenmesinde en önemli adım aynı cisim için farklı noktalardan bindirmeli olarak yapılan ve her birisi tarayıcı alet merkezli yerel bir koordinat sisteminde olan nokta bulutlarının ortak bir koordinat sisteminde birleştirilmesidir. Bu çalışmada Ilris 3D lazer tarayıcısı üzerine Nikon D80 kamera takılmış ve lazer tarayıcı nokta bulutları bu kameradan alınan fotoğraflarla birleştirilmiştir. Ayrıca lazer tarayıcı noktaları kameradan alınan fotoğraf yardımıyla renklendirilmiştir. Bunun için öncelikle oluşturulan test alanı yardımıyla lazer tarayıcı koordinat sisteminde kamera konum parametreleri 0.27 piksel karesel ortalama hata ile hesaplanmıştır. Uygulama kısmında tarayıcı üzerindeki kameradan alınan fotoğraflarla nokta bulutları farklı tekniklerle birleştirilmiş ve sonuçları diğer yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, fotoğraflarla nokta bulutlarının birleştirilmesi iteratif en yakın nokta ve 3B benzerlik dönüşümü yöntemlerine göre daha yüksek doğrulukla yapılabilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yersel lazer tarayıcı, Fotogrametri, Sensör birleşimi, Nokta bulutu, 3B dönüşüm, Digital kamera

ABSTRACT

Ph.D THESIS

A STUDY ON EVALUATION OF TERRESTRIAL LASER SCANNER POINT CLOUDS COMBINED WITH PHOTOGRAMMETRIC DATA

Cihan ALTUNTAŞ

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF SELÇUK UNIVERSITY THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY IN GEOMATIC ENGINEERING

Advisor: Prof. Dr. Ferruh YILDIZ

2011, 74 Pages

Jury
Prof.Dr. Ferruh YILDIZ
Prof. Dr. Şirzat KAHRAMANLI
Prof.Dr.Sıtkı KÜLÜR
Prof.Dr.Hüseyin Gazi BAŞ
Doç. Dr. İ. Öztuğ BİLDİRİCİ

The laser scanning is the latest technique to collect 3D spatial data and modeling for many applications such as 3D modeling of object or scene, documentation of cultural heritage, urban and architectural planning, deformation analysis and reverse engineering. However, 3D modeling with laser scanner is required photogrammetric data in addition to laser scanning data. Therefore digital camera is attached to laser scanner and it is used together. While the spatial data have been collected by laser scanner, texture data has been recorded by the digital camera from the object in this sensor combination. The camera has been integrated to laser scanner or it can be mounted later. Laser scanner point clouds are in a local coordinate system, which is instrumentally centered for each station. Therefore, first step in the process of laser scanner data is registration of overlapping point clouds into a common coordinate system. In this study, Nikon D80 camera was mounted on top of the Ilris 3D laser scanner, and point clouds were registered into a common coordinate system using the images which was recorded by the sensor combination camera. Moreover, laser scanner point clouds were colored by using the image. The exterior parameters between laser scanner and camera coordinate systems were estimated with root mean square error of 0.27 pixels on the test area. Point clouds were registered by the images by using different techniques and the results were compared with the other methods. As a result, more accurate point cloud registration results are obtained than the iterative closest point and 3D similarity methods.

Key Words: Terrestrial laser scanner, Photogrammetry, Sensor combination, Point cloud, 3D Registration, Digital camera

ÖNSÖZ

Fotogrametri, 3B nokta bilgisi ölçme ve modellemede uzun yıllardır kullanılan bir yöntemdir. Gelişen teknoloji ile birlikte 3B konum verisi ölçmede kullanılan en son teknik yersel lazer tarama yöntemidir. Yersel lazer tarayıcılar istenilen sıklıkta ve çok yüksek hızda obje yüzeyini tarayarak nokta bulutu şeklinde görüntülerler. Ölçülen cisme ait geometrik bilgiler nokta butlundan kolaylıkla çıkarılabilmektedir. Yersel lazer tarayıcılar tarihi eserlerin belgelenmesi, kentsel ve mimari planlama, 3B modelleme, sanayi tesislerinin ölçülmesi, deformasyon ölçmeleri ve sanal gerçeklik uygulamaları gibi pek çok mühendislik uygulamasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak nokta bulutlarının birleştirilmesi, renklendirilmesi ve doku kaplanması uygulamalarında lazer tarama verileri ile birlikte fotogrametrik verilere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle lazer tarayıcıların çoğunda bütünleşik digital kamera bulunmaktadır. Ancak daha iyi bir modelleme için lazer tarayıcılar farklı kameralarla birlikte kullanılabilir. Bu çalışmada Optech Ilris 3D yersel lazer tarayıcısına Nikon D80 kamera takılarak lazer tarayıcı nokta bulutlarının bu kameradan alınan fotoğraflarla birleştirilmesi anlatılmıştır.

Bu çalışmada yersel lazer tarayıcı ve fotogrametri ile ilgili pek çok konuya değinilmiş ve uygulamaları yapılmıştır. Bu tez çalışmasının, meslektaşlarımızın benzer konulardaki çalışmalarına faydalı olmasını dilerim.

Böyle güncel bir konuyu çalışmamı sağladığı ve yardımlarından dolayı Sayın hocam Prof. Dr. Ferruh YILDIZ'a çok teşekkür ederim.

Ayrıca katkılarından dolayı Prof.Dr.Sıtkı KÜLÜR hocama ve tez izleme komitesinde görevli hocalarım Prof.Dr.Şirzat KAHRAMANLI ve Doç.Dr.İ.Öztuğ BİLDİRİCİ'ye, Vienna University of Technology'de ki çalışmalarımda yardımlarından dolayı da Univ.Prof.Dipl.Ing.Dr. Norbert PFEIFER ve Univ.Ass.Dipl.Ing.Dr. Camillo RESSL'a çok teşekkür ederim.

Her zaman bana destek olan aileme de gösterdikleri sabır için teşekkür ederim. Üzerimde büyük emekleri olan canım anneme ve babama sonsuz saygılarımla.

Cihan ALTUNTAŞ

KONYA-2011

İÇİNDEKİLER

TEZ BİLDİRİMİ……...…….iii

ÖZET…….....iv

ABSTRACT……v

ÖNSÖZ…….....vi

İÇİNDEKİLER……..vii

SİMGELER VE KISALTMALAR…….....ix

1. GİRİŞ…….……...1

2. LİTERATÜR ÖZETİ……..4

3. MATERYAL VE YÖNTEM…….....9

3.1. Yersel Lazer Tarayıcı Ölçme Prensipleri…….....11
3.2. Kamera Kalibrasyonu…….....13
3.3. Resim Çekme Makinesinin Lazer Tarayıcı Koordinat Sisteminde Konum Parametrelerinin Hesaplanması…….....15
3.3.1. Kamera konum parametrelerinin hesabı için ölçmeler.……...……..15
3.3.2. Kamera ve resim koordinat sistemleri…..…….17
3.3.3. Kontrol noktalarının resim koordinatları…….……..…...……18
3.3.4. Yansıma görüntüsü (Intensity image).……...18
3.3.5. Kontrol noktalarının lazer tarayıcı sisteminde koordinatları…….20
3.3.6. Doğrusallık koşulu…….20
3.3.7. Kamera konum parametrelerinin hesaplanması …..……..23
3.4. Kamera Konum Parametrelerinin Kontrolü.……24
3.4.1. Kontrol-1: Kontrol noktalarına ait resim koordinatlarının hesaplanması.….24
3.4.2. Kontrol-2: Lazer tarama noktalarının fotoğraf renkleri ve yansıma değerleri ile görüntülenmesi……...25
3.4.3. Kontrol-3: Yansıma değerleri ve fotoğraf renkleri grafiği……26

4. NOKTA BULUTLARININ BİRLEŞTİRİLMESİ…….28

4.1. İki Lazer Tarama Durak Noktasındaki Fotoğraflar Yardımıyla Nokta Bulutlarının Birleştirilmesi……..28
4.2. Tek Lazer Tarama Durak Noktasındaki Fotoğraf Yardımıyla Nokta Bulutlarının Birleştirilmesi……..31
4.3. Işın Demetleri Dengelemesi ile Nokta Bulutlarının Birleştirilmesi…….33
4.4. Nokta Bulutlarının Renklendirilmesi…….....34
4.5. Karşılıklı Yöneltme……..34
4.5.1. Yalnızca ikinci resim elemanları (b_y,b_z,ω_2,φ_2,κ_2) ile karşılıklı yöneltme…..34
4.5.2. Yalnızca döndürme parametreleri (φ_1,κ_1,ω_2,φ_2,κ_2) ile karşılıklı yöneltme…38
4.5.3. Karşılıklı yöneltme için alternatif yöntem……..……..39
4.5.4. Model koordinatlarının hesaplanması……..…….43

5. UYGULAMALAR……46

5.1. Uygulama-1: İki Lazer Tarama Durak Noktasındaki Fotoğraflar Yardımıyla Nokta Bulutlarının Birleştirilmesi……...46
5.2. Uygulama-2: Tek Lazer Tarama Durak Noktasındaki Fotoğraf Yardımıyla Nokta Bulutlarının Birleştirilmesi……..47
5.3. Ara Sonuç……49
5.4. Uygulama-3: Karşılıklı Yöneltme Parametreleriyle Birleştirmenin Cisim Üzerinde Uygulanması……....50
5.5. Uygulama-4: Kampüs Cami Lazer Taraması……...52
5.6. Uygulama-5: Nokta Bulutlarının Renklendirilmesi……60

6. ARAŞTIRMA SONUÇLARININ YORUMLANMASI……63

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER…….....66

KAYNAKLAR……...68

ÖZGEÇMİŞ……...72

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

$X_c,Y_c,Z_c,\omega,\varphi,\kappa$: Kamera konum parametreleri. Kameranın lazer tarayıcı koordinat sistemine göre koordinatları ve dönme açıları.

x,y,z: Tarayıcı alet merkezli nokta bulutu koordinatları

ρ : Lazer tarayıcı ve tarama noktası arasındaki eğik mesafe

α :Lazer tarama ışın doğrultusunun x ekseni ile yatay düzlemde yaptığı açı

β :Lazer tarama ışın doğrultusunun yatay düzlemle yaptığı eğim açısı

O_{YLT} :Lazer tarayıcı koordinat sisteminin orijini

O_G :Yer koordinat sisteminin orijini

Δr : Işınsal distorsiyon

g_{13}, g_{14}: Işınsal distorsiyon katsayıları K1 ve K2

r_o :5.253768667 mm (r_o resmin maksimum yarıçaplı iç çemberinin yaklaşık 2/3 dür (Luhmann ve ark., 2006).)

r : Işınsal uzaklık

x, y : Resim koordinatları

Δx, Δy : x, y resim koordinatları için distorsiyon düzeltmeleri

u,v : Resim noktalarının piksel koordinatları

x_o,y_o : Asal nokta koordinatları

PP : Resim asal noktası

M : Resim orta noktası

I : Lazer tarama noktasının yansıma (intensity) değeri

c : Kamera odak uzaklığı

S1,S2 : Birinci ve ikinci lazer tarama durak noktaları

C1,C2 : Lazer tarayıcı ve kamera birleşimi ile yapılan ölçüde birinci ve ikinci lazer tarama durak noktalarında kamera projeksiyon merkezleri

$[X\ Y\ Z]_{S1}^T$: Birinci durak noktası lazer tarayıcı koordinatları

$[X\ Y\ Z]_{S2}^T$: İkinci durak noktası lazer tarayıcı koordinatları

$[X_o\ Y_o\ Z_o]^T$: İkinci taramanın orijininin birinci taramanın koordinat sistemine göre koordinatları

λ : Ölçek katsayısı

$R_{\omega\varphi\kappa}$:3x3 boyutlu ortogonal dönme matrisi

b_x,b_y,b_z : İzdüşüm merkezleri arasındaki baz vektörü bileşenleri

$X_{c2},Y_{c2},Z_{c2},\omega_{c2},\varphi_{c2},\kappa_{c2}$: İkinci durak noktasında tarayıcı üzerindeki kameranın birinci durak noktası lazer taramasının koordinat sistemine göre koordinatları ve dönme açıları

P : Cisim noktası

p_1,p_2 : P cisim noktasının birinci ve ikinci resimdeki karşılıkları

x',y',-c : P cisim noktasının birinci resim koordinatları

x",y",-c: P cisim noktasının ikinci resim koordinatları

O_1,O_2 : Karşılıklı yöneltmede birinci ve ikinci resmin izdüşüm merkezleri

b :Baz vektörü (b_x,b_y,b_z bileşenleri ile tanımlı)

r' :Eşlenik noktanın sol resim koordinatları ile tanımlanan vektör

r" :Eşlenik noktanın sağ resim koordinatları ile tanımlanan vektör

z',z" : Birinci ve ikinci resimde resim noktalarının üçüncü boyut değerleri (-c)

$\omega_2,\varphi_2,\kappa_2$: Karşılıklı yöneltmede ikinci resimin birinci resme göre dönme açıları

p_n : Karşılıklı yöneltmede model noktalarındaki paralaks (y'-y")

Z_1,Z_2 : Alternatif yöntemle karşılıklı yöneltmede projeksiyon merkezlerinin model koordinatları

F : Ana matris

E : Esas matris

C_1,C_2 : Alternatif yöntemle karşılıklı yöneltmede resimlerin asal nokta koordinatları

$\mu 1, \mu 2$: Alternatif yöntemle karşılıklı yöneltmede odak uzaklıkları için ölçek katsayıları

Kısaltmalar

3B : 3 Boyutlu

YLT : Yersel Lazer Tarayıcı

KKP : Kamera Konum Parametreleri ($X_c,Y_c,Z_c,\omega,\varphi,\kappa$)

İEYN : İteratif En Yakın Nokta (Iterative Closest Point)

SIFT : Scale Invariant Feature Transform

CCD : Charge Coupled Device

RGB : Red, Green, Blue

VRML: The Virtual Reality Modeling Language

LIDAR : Light Detection and Ranging

RANSAC : Random Sample Consensus

1. GİRİŞ

3 boyutlu (3B) ölçme ve modelleme uygulamaları giderek daha fazla alanda ihtiyaç duyulan bir uygulama haline gelmektedir. 3B ölçme uygulamalarında kullanılan en son teknik lazer tarama yöntemidir ve popülaritesi her geçen gün artmaktadır. Lazer tarama; uçak helikopter gibi araçlarla havadan ya da yersel aletlerle yapılabilmekte ve LIDAR (Light Detection and Ranging) olarak da adlandırılmaktadır. Bu çalışmanın konusu yersel lazer tarayıcı (YLT) larla ölçme ve modellemedir.

YLT'lar ölçme alanını çok yüksek hızda ve istenilen sıklıkta nokta dizileri şeklinde tarayarak nokta bulutu halinde görüntülerler. YLT'lar ölçülen noktanın tarayıcıdan olan mesafesini, ölçme doğrusunun yatay ve düşey açısını ve noktanın yansıma değerini ölçmektedirler. Ölçüler tarayıcı alet merkezli 3B yerel bir koordinat sisteminde ifade edilir. Lazer tarayıcılarda bütünleşik halde bulunan kamera sayesinde taranan noktalar için renk kaydı da yapılabilmektedir. Lazer tarayıcılar bugüne kadar tarihi eserlerin belgelenmesi, deformasyon ölçmeleri, planlama, 3B modelleme ve görüntüleme uygulamaları gibi pek çok mühendislik uygulamasında kullanılmıştır. Özellikle tarihi ve kültürel eserlerin belgelenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Lazer tarayıcıların çoğunda bütünleşik halde digital kamera bulunmaktadır. Digital kamera görüntüleri; lazer tarayıcı nokta bulutlarının birleştirilmesinde, taranan noktalara renk değeri atanmasında ve doku kaplama uygulamalarında kullanılmaktadır.

Lazer tarayıcı verilerinin işlenmesinde en önemli adımlardan birisi, nokta bulutlarının birleştirilmesi yani farklı durak noktalarında yapılan ve her biri yerel bir koordinat sisteminde olan taramaların ortak bir koordinat sistemine dönüştürülerek birleştirilmesidir. Bunun için genellikle taramalardan birisinin koordinat sistemi referans olarak seçilir ve diğer taramalar ardışık olarak bu taramanın koordinat sistemine dönüştürülür. Taramalar arasındaki 3B dönüşüm parametreleri nokta bulutlarından seçilen eşlenik noktalarla hesaplanmaktadır. Ancak yeterli geometrik detay içermeyen alanlarda nokta bulutundan eşlenik nokta tespiti ve dolayısıyla nokta bulutlarının birleştirilmesi çok zor olmaktadır. Oysa fotoğraflar çok iyi doku bilgisi içerdiğinden eşlenik nokta seçimi kolaylıkla yapılabilmektedir. Tarayıcıya takılan kameradan alınan yüksek çözünürlüklü fotoğraflarla cisim üzerinde eşlenik nokta seçimi için belirgin geometrik detaylar olmasa bile lazer taramaları nokta sıklığından bağımsız olarak yüksek doğrulukla birleştirilebilir. Bindirmeli yapılan taramalar arasındaki 3B dönüşüm parametreleri tarayıcı üzerindeki kameradan alınan fotoğrafların

fotogrametrik değerlendirmesi ile hesaplanabilir. Nokta bulutlarına otomatik birleştirme teknikleri uygulanmasında da tarayıcı üzerine takılan kamera görüntülerinden yaygın olarak yararlanılmaktadır. Ayrıca yeterince bindirmeli yapılamayan taramalar arasındaki dönüşüm parametreleri ilave fotoğraflarında ışın demetleri dengelemesine dahil edilmesiyle hesaplanabilmektedir. Diğer yandan, lazer tarayıcı noktalarına renk ataması için tarayıcıya entegre kameradan alınan fotoğraflar kullanılmaktadır. Ancak pek çok uygulamada nokta bulutu görünümlerinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Nokta bulutlarının görünümü yüksek çözünürlüklü fotoğraflarla yeniden renklendirilerek iyileştirilebilmektedir. Bunun için lazer tarayıcıların yüksek çözünürlüklü digital fotoğraf makineleri ile birlikte kullanılması gerekir. Lazer tarayıcılar da bütünleşik olarak digital kamera bulunur ancak bunlar düşük çözünürlüklüdür ve tarayıcıdan bağımsız olarak kullanılamazlar. Bugün lazer tarayıcı üreten firmalar dahi tarayıcıların yüksek çözünürlüklü kameralarla birlikte kullanılmasını tavsiye etmektedirler. Kamera (CCD image sensör) ışın görüntülemek, tarayıcı ise mesafe ölçmek için kullanıldığından kamera ve tarayıcı birleşiminden oluşan bu sistem hibrit sensör olarak da adlandırılmaktadır.

Lazer tarayıcı ölçülerini ve digital kamera görüntülerini birlikte kullanabilmek için resim çekme makinesinin lazer tarayıcı koordinat sisteminde kamera konum parametrelerinin (X_c,Y_c,Z_c,ω,φ,κ) yüksek doğrulukla belirlenmesi gerekir. Kamera konum parametreleri (KKP) aynı zamanda 3B tarayıcı ve 2B resim koordinat sistemi arasındaki dönüşüm parametrelerini ifade eder. Her farklı kamera ve lazer tarayıcı birleşimi için bu parametreler farklı olacaktır. Bu çalışmada, Optech Ilris 3D yersel lazer tarayıcısına Nikon D80 kamera monte edilmesi, kamera ve tarayıcı koordinat sistemleri arasındaki dönüşüm parametrelerinin hesaplanması ve fotoğraflar yardımıyla nokta bulutlarının birleştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmanın bundan sonraki bölümlerinde KKP resim ve tarayıcı koordinat sistemleri arasındaki öteleme ve dönme parametrelerini ifade etmek için kullanılacaktır. KKP hesaplandıktan sonra üç farklı kontrol yöntemi ile kontrol edilmiştir. Uygulama kısmında fotoğraflar yardımıyla nokta bulutları farklı yöntemlerle birleştirilmiş ve sonuçları diğer yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada bütün hesaplamalar Matlab yazılımında hazırlanan alt programlarla yapılmıştır. Bu giriş bölümünden sonra çalışmanın diğer bölümlerinde; 2. bölümde lazer tarayıcı ve kamera birleşiminde KKP'nin hesaplanması ve fotoğraflar yardımıyla nokta bulutlarının birleştirilmesini içeren literatür özeti, 3. bölümde kullanılan materyal ve yöntem, KKP'nin hesaplanması ve kontrolü, 4. bölümde tarayıcı

üzerindeki kameradan alınan fotoğraflarla nokta bulutlarının nasıl birleştirileceği açıklanmış, 5. bölümde nokta bulutlarının birleştirilmesine yönelik örnek uygulamalar ve nokta bulutlarının takılan kameradan alınan fotoğrafla renklendirilmesi uygulaması yapılmış, 6. bölümde araştırma sonuçlarının yorumlanması ve son olarak 7. bölümde sonuçlar ve öneriler verilmiştir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Lazer tarayıcı ve kamera birleşiminde kameranın lazer tarayıcı koordinat sisteminde konum parametreleri farklı yöntemlerle hesaplanmaktadır. Fotogrametride pek çok problemin çözümünde olduğu gibi kamera ve tarayıcı koordinat sistemleri arasındaki öteleme (X_c,Y_c,Z_c) ve dönme (ω,φ,κ) parametrelerinin çözümünde de doğrusallık koşulundan yararlanılır. Merkezsel izdüşümde doğrusallık koşulu izdüşüm merkezi, resim noktası ve cisim noktasının aynı doğru üzerinde olmasını ifade eder (Kraus, 2007).

El-Hakim ve ark.(1996) 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 kullanılabileceği gösterilmiştir.

Wendt ve Dold (2005) de KKP'ni hesaplamak için noktaların aynı düzlemde yer almadığı özel bir test alanı oluşturulmuştur. Bu test alanı kullanılarak kamera kalibrasyonu ve parametre 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 (2006a) 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 doğrusallık koşulu ile KKP hesaplanmıştır.

Aquilera ve ark.(2009) da, lazer tarayıcı koordinat sistemine göre kamera konumunun hesaplanması için digital kamera görüntüsü ve lazer tarayıcı ölçülerinden elde edilen 2B mesafe görüntüsü (range image) birlikte kullanılmıştır. Digital 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 digital 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 digital görüntüdeki piksel koordinatları ve mesafe görüntüsünün lazer tarayıcı koordinatları eşleştirilerek doğrusallık koşulu ile parametreler hesaplanmıştır. Noktaların eşleşme durumu analiz edilerek (Sampson hata analizi) hatalı eşlenmiş 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. Parametreler; m_x=0.1mm, m_y=0.8mm, m_z=0.9mm, m_ω=1.85", m_φ=1.56", m_κ=0.30" karesel ortalama hata ile hesaplanmıştır.

YLT ile bir objenin tamamını görüntüleyebilmek için değişik durak noktalarından çok sayıda tarama yapmak gerekir. Her durak noktasından yapılan tarama tarayıcı alet merkezli yerel koordinat sisteminde olduğundan modeli oluşturabilmek için bütün taramalar tek bir koordinat sisteminde birleştirilmelidir (Pfeifer ve Briese, 2007; Altuntaş ve Yıldız, 2008; Yıldız ve Altuntaş, 2009). Nokta bulutlarının birleştirilmesinde kullanılan yöntemler; objenin geometrik özelliklerine bağlı yöntemler, hedef işaretli yöntemler ve görüntü esaslı yöntemler olarak başlıca üç grupta

toplanabilir. Geometrik özelliklere bağlı yöntemler; iteratif en yakın nokta (iterative closest point) (Besl ve McKay, 1992; Chen ve Medioni, 1992; Zhang, 1994; Liu, 2006) ve en küçük karelerle 3B görüntü eşleme (Gruen ve Akca, 2005) yöntemleridir. Ayrıca nokta bulutlarından belirli geometrik detaylar çıkarılarak bu detaylar yardımıyla da dönüşüm parametreleri hesaplanabilmektedir (Deveau ve ark.,2004; Briese ve Pfeifer, 2008). Belirgin geometrik detayları olmayan taramaların birleştirilmesinde bu yöntemler başarılı bir şekilde kullanılamazlar. Hedef noktaları ile birleştirme tekniklerinde ise tarama alanında önceden belirli sayıda kontrol noktası işaretlenir ve nokta bulutları arasındaki dönüşüm parametreleri bu noktalar yardımıyla hesaplanır (Scaioni, 2002; Akca, 2003; Al-Manasir ve Fraser, 2006a). Bu yöntemde hedef işaretlerinin cisim üzerine işaretlenmesi ve koordinatlarının ölçülmesi ayrıca bir zaman gerektirir. Bazı durumlarda obje üzerinde nokta işaretlenmesi de mümkün olmayabilir.

Görüntü esaslı birleştirme yönteminde nokta bulutlarının birleştirilmesinde tarayıcı üzerine monte edilen digital kamera görüntüsü ya tek başına (Al-Manasir ve Fraser, 2006a) yada lazer tarayıcı ölçüleri ile birlikte (Dold ve Brenner, 2006; Al-Manasir ve Fraser, 2006b) kullanılmaktadır. Görüntü esaslı yöntemler bazı otomatik birleştirme tekniklerinde yaklaşık yöneltme parametrelerinin hesaplanması için de kullanılmaktadır.

Lazer tarayıcı nokta bulutundan oluşturulan 2B fotoğrafik görüntü ve kameradan alınan fotoğraf fotogrametrik olarak değerlendirilerek kamera konumunun hesaplanması Forkuo ve King (2003) de verilmektedir. Ayrıca baz/yükseklik oranının doğruluğa etkisi araştırılmış ve dört farklı kamera konumu için kontrol noktalarında oluşan farklar verilmiştir. Model koordinatlarının karesel ortalama hataları x,y için 2mm-7mm, z için 0.06m-0.09m arasında elde edilmiştir. Bütün testlerde en büyük fark (0.091m-0.112m) z değeri için elde edilmiştir.

Li (2005) de kamera görüntüleri eşleştirilerek benzer detaylar çıkarılmış, yanlış eşleme olasılığına karşı resimdeki noktaların lazer tarama koordinatları ile de kontrol yapılmıştır. Karşılıklı eşlenik noktalar bulunduktan sonra nokta bulutları birleştirilmiştir.

Al-Manasir ve Fraser (2006a) da nokta bulutları tarayıcı üzerindeki kamera görüntülerinin karşılıklı yöneltmesi ile birleştirilmiştir. Test alanında ışın demetleri dengelemesi ile yapılan birleştirmede kontrol noktalarındaki kalıntı hatalar 3mm olarak ölçülmüştür. Hedef işaretleri olmadan yapılan uygulamada ise nokta bulutlarının birleştirme hassasiyeti σ_x=0.027m, σ_y=0.025m, σ_z=0.025m olarak elde edilmiştir. Nokta

bulutları arasında yeterli bindirme olmayan taramalar lazer tarayıcı üzerindeki kamera ile görüntülenerek nokta bulutları için dönüşüm parametreleri ışın demetleri dengelemesi ile hesaplanmıştır. Al-Manasir ve Fraser (2006b) de renkli özel bir hedef işareti oluşturulmuş ve tarama alanına yerleştirilmiştir. Bu hedef işareti fotoğraflardan otomatik olarak belirlenmiş ve kamera ve tarayıcı arasındaki parametrelerle bu resim noktalarına karşılık gelen lazer tarama noktaları belirlenmiştir. Daha sonra 3B benzerlik dönüşümü ile nokta bulutları arasındaki dönüşüm parametreleri m_x=1.9mm, m_y=1.7mm, m_z=2mm olarak hesaplanmıştır. Dönüşüm parametreleri iteratif en yakın nokta (İEYN) yöntemine göre daha hassas olarak hesaplanmıştır.

Dold ve Brenner (2006) ve Brenner ve ark.(2008) da nokta bulutlarından düzgün geometrik şekilli detaylar çıkarılarak eşleştirilmiş ve nokta bulutları birleştirilmiştir. Çıkarılan şekillerin tarayıcı üzerindeki kamera görüntüsünden karşılıkları KKP yardımıyla bulunmuş ve bu detaylara ait görüntülerin korelasyonlu eşleştirilmesi ile birleştirme doğruluğu artırılmıştır.

Kang ve ark.(2007) de otomatik birleştirme için görüntü eşleme tekniği kullanılarak eşlenik noktalar bulunmuştur. Bu eşlenik noktaların lazer tarayıcı koordinatları hesaplanarak en küçük kareler yöntemi ile iteratif olarak nokta bulutları arasındaki dönüşüm parametreleri hesaplanmıştır. Kang ve ark.(2009) da benzer yöntemler kullanılarak panoramik görüntüler otomatik olarak birleştirilmiştir. Nokta bulutları önce ikişerli olarak birleştirilmiş daha sonra dönüşüm hatalarını tüm modele yayarak etkisini azaltmak için oluşturulan model ışın demetleri dengelemesi ile değerlendirilerek dönüşüm parametreleri tekrar hesaplanmıştır.

Lambers ve ark.(2007) de Riegl LMS Z420i lazer tarayıcısına Nikon D100 digital fotoğraf makinesi takılarak birlikte kullanılmıştır. Kameranın lazer tarayıcı koordinat sistemindeki konumu hassas olarak bilindiğinden fotoğraflar doğrudan nokta bulutu üzerine kaplanarak fotoğraf dokusu kaplanmış 3B modeller elde edilmiştir.

Barnea ve Filin (2007) de tarayıcı üzerine monte edilen kamera görüntülerinden SIFT (Scale Invariant Feature Transform) (Lowe, 2004) operatörü yardımıyla eşlenik noktalar tespit edilerek bu noktalara karşılık gelen lazer tarayıcı noktaları bulunmuş, daha sonra RANSAC (Random Sample Concensus) algoritması ile bu noktalar eşleştirilerek dönüşüm parametreleri hesaplanmıştır. Benzer bir yöntem Forkuo (2005) de Harris kenar çıkarma operatörü (Harris ve Stephens, 1988) ile uygulanmıştır.

Tournas ve Tsakiri (2009) de HDS2500 lazer tarayıcı üzerine Nikon 4700 digital kamera takılmış, lazer tarayıcı üzerindeki kamera ile bindirmeli çekilmiş resimlerden

Harris operatörü ile eşlenik noktalar çıkarılmış ve bu noktaların lazer tarayıcı koordinatları ile nokta bulutları birleştirilmiştir. İki ayrı durak noktasından bindirmeli yapılan lazer taramaları x için 1.7mm, y için 1.6mm ve z için 2.4mm karesel ortalama hata ile birleştirilmiştir. El-Hakim ve ark.(1996) da nokta bulutlarının birleştirilmesinde ve doku kaplanmasında lazer tarayıcı ile birlikte kullanılan kamera görüntülerinden yararlanılmıştır. Detay seçimi ve nokta tespiti için fotogrametrik yöntem ve lazer tarama yöntemi birlikte kullanılmıştır.

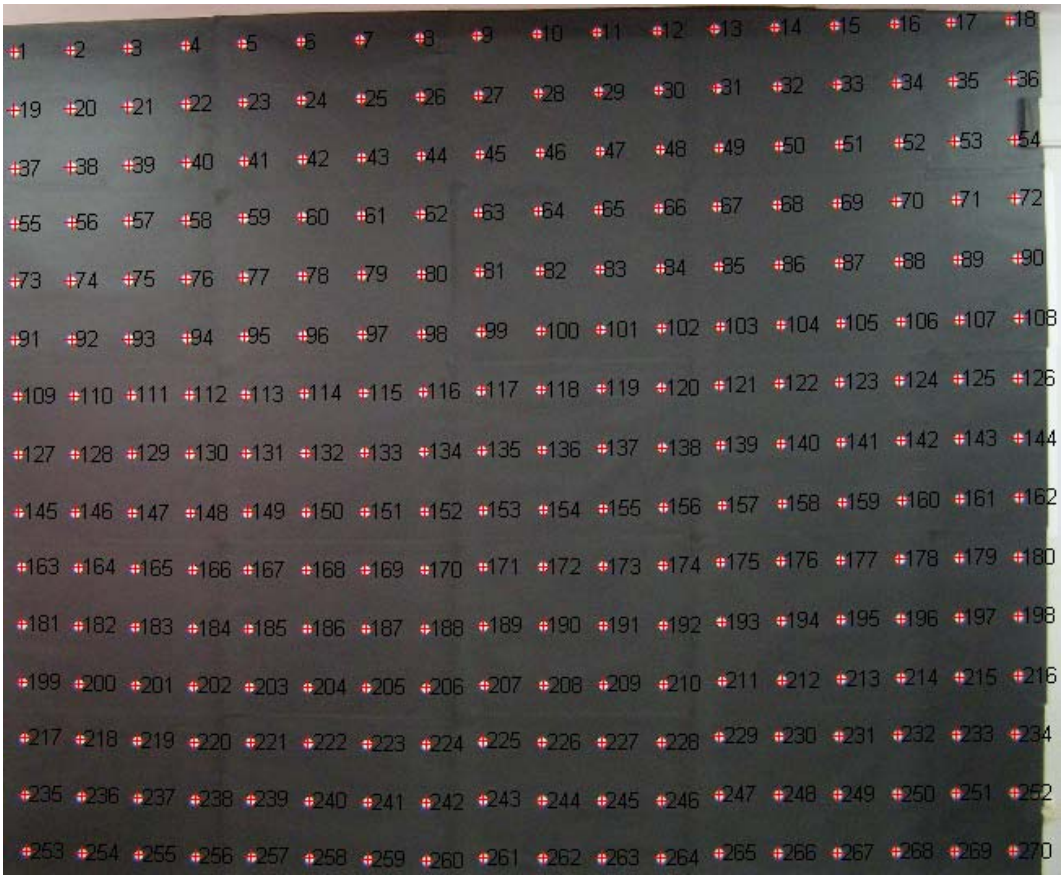
Altuntas ve ark.(2010a) ve Altuntas ve ark.(2010b) de nokta bulutları tarayıcı üzerindeki kameradan alınan fotoğrafların karşılıklı yöneltmesi ile birleştirilmiş ve İEYN yöntemi ile karşılaştırıldığında daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmüştür.

Digital kamera kalibrasyonu; kamera odak uzaklığı, asal nokta koordinatları, piksel boyutları ve distorsiyon katsayılarının belirlenmesini ifade eder. Yersel fotogrametrik çalışmalarda kullanılan digital kameraların kalibrasyonu için değişik test alanları ve test teknikleri uygulanmaktadır. Remondino ve Fraser (2006)'da farklı yöntemler kullanılarak elde edilen kalibrasyon sonuçları verilmiştir. Renkli kameralar için özel hedef işaretleri ile otomatik kalibrasyon ve resimlerin yöneltilmesi Cronk ve ark.(2006)'da açıklanmıştır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışmada Ilris 3D lazer tarayıcısına Nikon D80 (10 megapiksel) kamera monte edilmiş ve lazer tarayıcı koordinat sistemine göre KKP (X_c,Y_c,Z_c,ω,φ,κ) hesaplanmıştır. Daha sonra bu kameradan alınan fotoğraflarla nokta bulutları birleştirilmiştir.

KKP'nin hesaplanması için Selçuk Üniversitesi Fotogrametri Laboratuarında özel bir test alanı oluşturulmuştur. Bir duvar üzerine 3x3.6m^2 büyüklüğünde bir alanda 20 cm aralıklarla 270 kontrol noktası işaretlenmiştir. Noktalar siyah zemin üzerine 3cm çaplı beyaz noktalar olarak işaretlenmiştir (Şekil 3.1). Kontrol noktalarının işaretleri lazer nokta bulutundan ve fotoğraftan kolayca seçilebilecek şekilde daire olarak belirlenmiştir. Eğer hedef işaretleri için geometrik olarak tanımlanabilecek bir şekil belirlenmezse gerek nokta bulutundan gerekse fotoğraftan kontrol noktalarının seçimi zor olacaktır.



Şekil 3.1. Test alanında kontrol noktalarının dağılımı

Tarayıcıya takılacak kameranın iç yöneltme parametreleri kameranın kalibrasyonu ile hesaplanmış, kamera kalibrasyonu parametre hesabından bağımsız

olarak yapılmıştır. İstenilirse kamera kalibrasyonu da parametre hesabı ile birlikte yapılabilir. Ancak bunun için kullanılacak test alanında kontrol noktaları farklı düzlemlerde dağılacak şekilde oluşturulmalıdır (Wendt ve Dold, 2005).

Nikon D80 fotoğraf makinesi özel bir alet yardımıyla Optech Ilris 3D lazer tarayıcısına monte edildi (Şekil 3.4). İstenildiğinde bu alet sayesinde kamera tarayıcıdan sökülüp bağımsız olarak kullanılabilir ve tekrar aynı pozisyonda tarayıcıya 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.

2B resim koordinatları ile 3B tarayıcı koordinatları arasındaki dönüşüm probleminin çözümü, tarayıcı ve kamera koordinat sistemleri arasındaki dönüşüm parametrelerinin (KKP) hesabını gerektirir. Bu problem doğrusallık (collinearity) koşulunu kullanarak uzay geriden kestirme yöntemi ile çözülür (Kraus, 2007; Al-Manasir ve Fraser, 2006a). Çözüm için test alanının tek bir durak noktasından taranması ve tarayıcıya takılan kamera ile fotoğrafının çekilmesi yeterlidir. Bilinmeyen KKP'nin (X_c,Y_c,Z_c,ω,φ,κ) hesaplanabilmesi için resim ve lazer tarayıcı koordinatları bilinen en az üç ortak nokta yeterlidir. Ancak sonuçların güvenilirliğini ve hassasiyetini artırmak için uygun dağılımda daha fazla nokta ile çözüm yapılmalıdır. Nokta sayısı arttığında en küçük kareler yöntemi ile tekrarlamalı olarak çözüm yapılır. KKP'nin hesabı için öncelikle tarayıcıya takılan kameranın kalibrasyonunun yapılması gerekir. Çünkü KKP'nin hesaplanmasında odak uzaklığı, asal nokta koordinatları ve ışınsal (radyal) distorsiyon katsayıları kullanılacaktır.

Gerek KKP'nin hesaplanması, gerekse nokta bulutlarının birleştirilmesi ve diğer uygulamalar açısından tarayıcıya takılacak kameranın görüş açısı lazer tarayıcının görüş açısı ile uyumlu olmalıdır. Yani durulan noktada lazer tarayıcıdan ve kameradan aynı büyüklükte alanlar görüntülenebilmelidir. Eğer kameranın görüş alanı lazer tarayıcıdan daha büyük olursa taranan alan fotoğrafın küçük bir bölümünü oluşturacaktır. Bu durumda KKP doğru olarak hesaplanamayacaktır. Nikon D80 kamerasının 24mm objektif ile görüş alanı lazer tarayıcı ile uyumludur. Bu koşullar dikkate alındığında Nikon D80 ve Ilris 3D lazer tarayıcısı birlikte kullanılabilecek bir sensör ikilisidir.

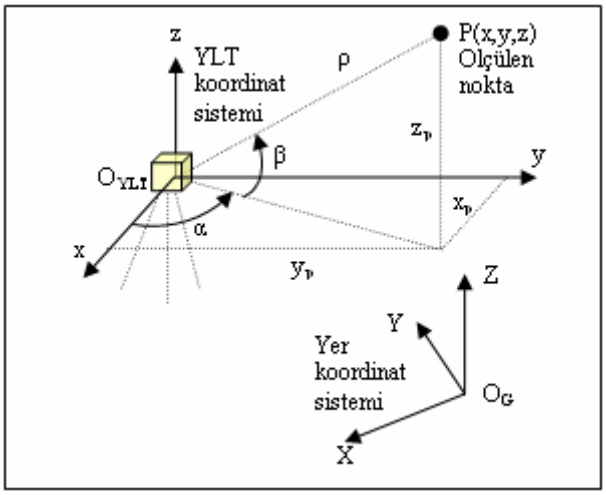
KKP hesaplandıktan sonra bu parametreler kullanılarak nokta bulutları birleştirilmiştir. Nokta bulutlarının birleştirilmesi için dört farklı uygulama yapılmış ve sonuçları diğer yöntemlerle karşılaştırılmıştır. İlk iki uygulamada hedef işaretleri

fotoğraftan özel işaretleri yardımıyla seçilmiş ve dönüşüm parametreleri hesaplanmıştır. Üçüncü uygulamada seçilen bir yüzey iki durak noktasından lazer tarayıcı ve kamera kombinasyonu ile taranarak modellenmiştir. Nokta bulutları arasındaki dönüşüm parametreleri tarayıcı üzerindeki kameradan alınan fotoğrafların karşılıklı yöneltmesi ile hesaplanmış, karşılıklı yöneltmede eşlenik noktalar fotoğraflardan manuel olarak seçilmiştir. Dördüncü uygulamada Kampus camisi lazer tarayıcı ve kamera kombinasyonu ile ölçülerek modellenmiştir. Nokta bulutları arasındaki dönüşüm parametreleri tüm alana ait fotoğrafların ışın demetleri dengelemesi ile hesaplanmıştır. Son olarak KKP kullanılarak kamera görüntüsünden nokta bulutlarının renklendirilmesi uygulaması yapılmıştır.

3.1. Yersel Lazer Tarayıcı Ölçme Prensipleri

Lazer tarayıcılar, ölçülecek objeyi yatay ve düşey yönde belirli bir açı altında nokta dizileri şeklinde tarayarak nokta bulutu halinde görüntülenmesini sağlarlar (Lichti ve Gordon, 2004). Her lazer tarama noktası için tarayıcı alet merkezli kutupsal koordinatlar ölçülür. Bunlar; ölçülen noktaya olan eğik uzaklık ρ, ölçüm doğrusunun x ekseni ile yatay düzlemde yaptığı açı α ve ölçüm doğrusunun yatay düzlemle yaptığı eğim açısı β dır. Aynı zamanda ölçülen yüzeyin yapısına ve ölçme uzaklığına bağlı olarak dönen sinyalin yoğunluğu da ölçülerek kaydedilir. YLT ölçüleri ve tarayıcı koordinat sistemi Şekil 3.2 de görülmektedir (Scaioni, 2005; Altuntaş ve Yıldız, 2008; Yıldız ve Altuntaş, 2009). Şekil 3.2'de;

x,y,z :Tarayıcı alet merkezli nokta bulutu koordinatları,
ρ :Lazer tarayıcı ile ölçülen cisim noktası arasındaki eğik mesafe,
α :Işın doğrultusunun x ekseni ile yatay düzlemde yaptığı açı,
β :Işın doğrultusunun yatay düzlemle yaptığı eğim açısı,
O_{YLT} :Lazer tarayıcı koordinat sisteminin orijini,
O_G :Yer koordinat sisteminin orijini.



Şekil 3.2. Yersel lazer tarayıcı ve yer koordinat sistemleri

Bu ölçüler arasındaki geometrik ilişki ve taranan noktaların tarayıcı alet merkezli 3B koordinatları (x,y,z), (3.1) bağıntısı ile ifade edilir (Elkhrachy ve Niemeir, 2006; Scaioni, 2005; Lichti ve Gordon, 2004).

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \rho \begin{bmatrix} \cos\beta\cos\alpha \\ \cos\beta\sin\alpha \\ \sin\beta \end{bmatrix} \tag{3.1}$$

Lazer tarayıcı nokta bulutları ölçülen alanı gerçek ölçüleri ile temsil ettiği için objenin 1:1 ölçekli 3B modeli olarak da düşünülebilir. Yersel lazer tarayıcıların totalstation gibi belirli bir noktaya kurulup yönlendirilmeleri mümkün olmadığı için tarayıcı alet merkezli x,y,z eksenleri her defasında farklı bir doğrultuyu gösterecektir. Bu nedenle bir alan için yapılan bütün taramalar ortak bir koordinat sisteminde birleştirilmelidir. Tarayıcı ile bütünleşik yapıda digital kamera kullanılıyorsa ölçülen her nokta için renk (Red, Green, Blue) kaydı da yapılabilir (Altuntaş ve Yıldız, 2008).

Tarama işlemleri esnasında çoğu tarayıcının koordinatı bilinen nokta üzerine kurulması ve düzeçlenmesi donanım olarak mümkün değildir ve buna gerek de yoktur. Örneğin bir binanın 3B modeli oluşturulacaksa, alet herhangi bir noktaya kurularak bina yüzeyinde görülen alan taranır. Daha sonra alet ilk taramanın bitişik alanını tarayacak şekilde uygun bir yere kurularak tarama yapılır. Her tarama bir önceki tarama ile belirli oranda ortak taranmış alanlar oluşturacak şekilde yapılır. Bu ortak taranmış alanlar nokta kümelerinin birleştirilmesi için gereklidir. Tarayıcı alet orijinli x,y,z nokta bulutu koordinatları, nokta bulutlarından birisinin koordinat sistemine dönüştürülerek

birleştirilir. Lazer tarama ölçülerinden oluşan 3B nokta bulutu modeli ek ölçüler ve hesaplamalarla jeodezik koordinat sistemine ya da başka bir referans koordinat sistemine dönüştürülebilir (Yıldız ve Altuntaş, 2009; Scaioni, 2005). Lazer taramaları arasında ortak taranmış alanlar yoksa her tarama koordinatı ölçülen en az üç nokta ile ortak koordinat sistemine dönüştürülür ve birleştirilir.

Yersel lazer tarayıcılar ölçülen nokta ile tarayıcı arasındaki mesafeyi ışığın gidiş geliş zamanı ile (Riegl, Leica, Trimble, Optech, Callidus, I-Site) ya da faz farkı ile (Zoller+Fröhlich, Faro, 3rdTech) ölçerler. İkinci gruptakiler mesafe ölçümünde yayılan ve kaydedilen lazer dalga boyları arasındaki faz farkını kullanırlar. Işığın gidiş-geliş zamanını kullanan tarayıcıların ölçme mesafeleri daha uzundur. Buna karşılık faz farkı ile tarama yapan aletlerin nokta konum doğrulukları daha iyidir. Yersel lazer tarayıcılar yatayda 360^o düşeyde 270^o lik bir alanda panoramik tarama yapılabilirler (Pfeifer ve Briese, 2007). Ölçme uzunlukları 2.5m-3000m arasında değişmektedir. Ölçme doğrulukları değişik markalar için farklılık göstermekle birlikte genel olarak nokta konum doğrulukları 100m de ±2mm ile 2.5cm arasındadır (Boehler ve ark.,2003; Pfeifer ve Briese, 2007).

3.2. Kamera Kalibrasyonu

Kamera kalibrasyonu kameranın fotoğraf çekimini etkileyen geometrik özelliklerinin (odak uzaklığı, asal nokta koordinatları, distorsiyon parametreleri, piksel büyüklüğü, resim boyutları) yani kamera ile alınan fotoğrafın merkezsel izdüşümden olan sapmalarını ortaya çıkaran parametrelerin belirlenmesini ifade eder. Fotogrametrik değerlendirme işlemlerinde bu parametrelerin hesaplanması iç yöneltme olarak da tanımlanır. Bu çalışmada kamera kalibrasyonu için PI 3000 kamera kalibrasyon yazılımı kullanılmıştır. Bu programın kullandığı kalibrasyon ağının Nikon D80 kamera ile farklı açılardan fotoğrafları çekilmiştir. Fotoğraflar programa aktarılmış ve on adet fotoğrafla değerlendirme yapılmıştır. Kalibrasyonda her fotoğrafta dört ana nokta seçildikten sonra diğer test noktaları otomatik olarak bulundu. Fotoğraflar ışın demetleri dengelemesi ile değerlendirilerek aşağıdaki kamera kalibrasyon bilgileri hesaplanmıştır.

Odak uzaklığı (c)	: 24.520746mm
Asal nokta x_o	: 11.973725mm
Asal nokta y_o	: 7.880653mm

Işınsal distorsiyon K1 : 0.0001677840

Işınsal distorsiyon K2 : -0.0000002806006

Teğetsel distorsiyon P1 : -0.00001574003

Teğetsel distorsiyon P2 : 0.000006188080

Piksel boyutu : 6.1 mikron

Resim boyutları : 3872 x 2592 piksel

Ditorsiyon değerleri (3.2) eşitliği (Kraus, 2007) ile hesaplanarak kameranın distorsiyon grafiği çıkarıldı (Şekil 3.3).

$$\Delta r = g_{13}.r.(r^2 - r_o^2) + g_{14}.r.(r^4 - r_o^4) \quad (3.2)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3.3)$$

$$\Delta x = \frac{\Delta r}{r}.x\,,\ \Delta y = \frac{\Delta r}{r}.y \quad (3.4)$$

Burada;

Δr : Işınsal distorsiyon

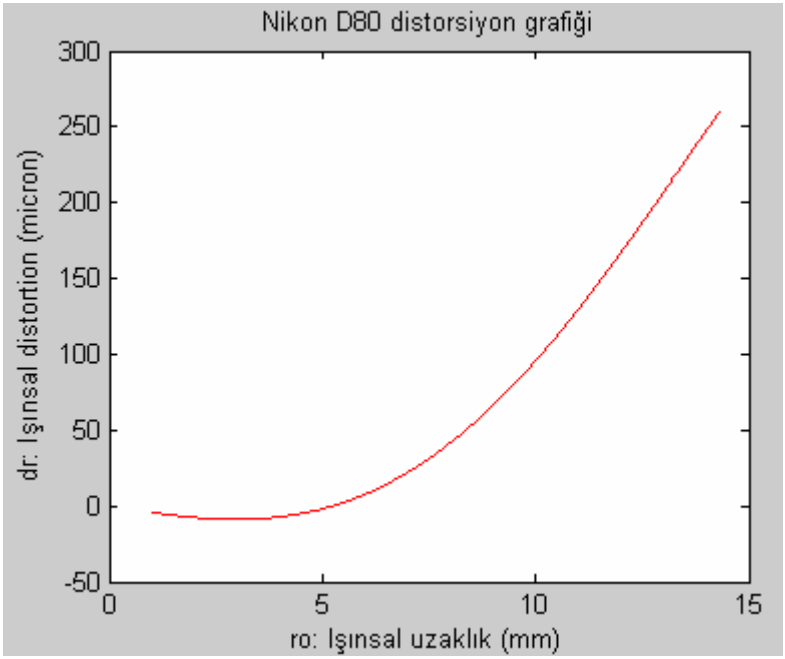
g_{13}, g_{14}: Işınsal distorsiyon katsayıları K1 ve K2

r_o :5.253768667 mm (r_o resmin maksimum yarıçaplı iç çemberinin yaklaşık 2/3 dür (Luhmann ve ark., 2006))

r : Işınsal uzaklık

x, y : Resim koordinatları

Δx, Δy : x, y koordinatları için distorsiyon düzeltmeleridir.



Şekil 3.3. Nikon D80 kamerasının distorsiyon grafiği

3.3. Resim Çekme Makinesinin Lazer Tarayıcı Koordinat Sisteminde Konum Parametrelerinin Hesaplanması

Yersel lazer tarayıcı ve kamera birleşimi için öncelikle lazer tarayıcı koordinat sisteminde kamera konumunun ve koordinat sistemleri arasındaki dönme açılarının yani KKP'nin (X_c,Y_c,Z_c,ω,φ,κ) hesaplanması gerekir. KKP, kameranın lazer tarayıcı koordinat sisteminde koordinatlarını ve dönüklüğünü ifade eder. Burada çözülecek problem 2B resim koordinat sistemi ile 3B tarayıcı koordinat sistemi arasındaki dönüşüm parametrelerinin hesaplanmasıdır (Şekil 3.9). Bu parametreler noktaların resim ve tarayıcı koordinatları arasında doğrusallık bağıntısı kurularak hesaplanır. Çözüm için en az üç ortak nokta yeterlidir. Ancak sonucun güvenirliğini ve hassasiyetini artırmak için daha fazla nokta ile çözüm yapılmalıdır. Nokta sayısı artığında en küçük kareler yöntemi ile çözüm yapılır. KKP'nin belirlenmesi için yapılan ölçü ve hesaplamalar aşağıda alt başlıklar halinde verilmiştir.

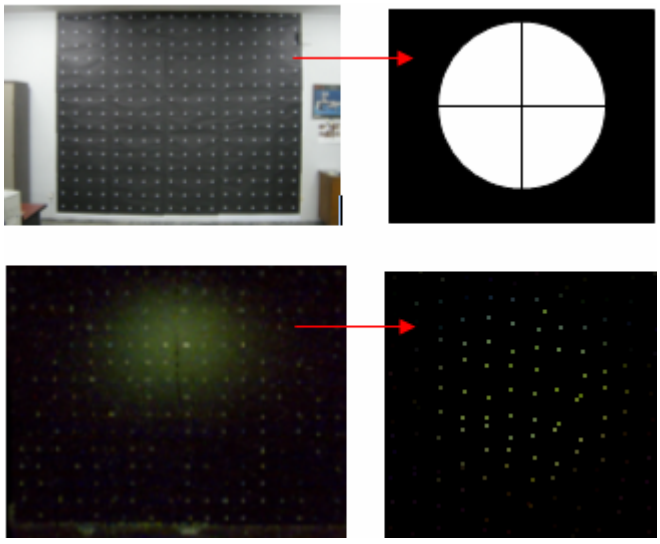
3.3.1. Kamera konum parametrelerinin hesabı için ölçmeler

Kamera özel aleti yardımıyla tarayıcıya sabit olarak takıldıktan sonra ölçü için lazer tarayıcı test alanından yaklaşık 6m uzakta bir noktaya kuruldu. Bu noktada hem

tarayıcıdan hem de kameradan test alanı aynı anda görülebilmektedir ve test alanı fotoğrafın tamamını kaplamaktadır. Test alanı 2mm nokta sıklığı ile tarandı ve tarayıcı üzerindeki kamera ile fotoğrafı çekildi (Şekil 3.4 ve Şekil 3.5). Test alanından yaklaşık 650000 nokta ölçülmüştür.



Şekil 3.4. YLT ve kamera birleşiminde KKP'nin hesaplanması için yapılan ölçmeler. Test alanının lazer tarayıcı ile taranması ve fotoğraf çekimi



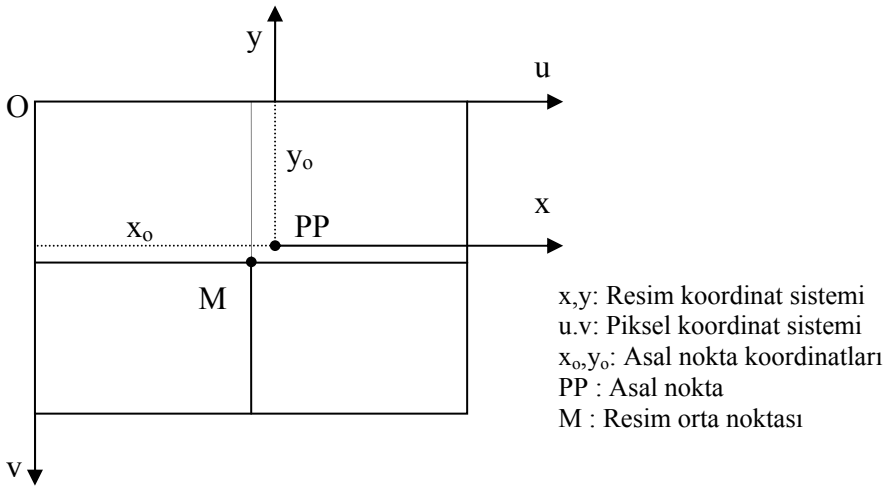
Şekil 3.5. Kamera konum parametrelerinin hesaplanması için yapılan ölçünün fotoğraf ve nokta bulutu görüntüleri ile kontrol noktasının fotoğraf ve nokta bulutu görüntüleri

3.3.2. Kamera ve resim koordinat sistemleri

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.

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 (Şekil 3.6). Fotogrametride kullanılan resim koordinat sistemi ise başlangıcı asal nokta (Principal Point), +x ekseni sağ doğrultu, +y ekseni yukarı doğrultu olarak tanımlanan bir koordinat sistemidir. Kamera kalibrasyonunda asal noktanın resim üzerindeki konumu u,v piksel koordinat sisteminde x_o,y_o koordinatları ile tanımlanmıştır. Fotogrametrik hesaplamalar için noktaların resim koordinatları (orijini asal nokta olan koordinat sistemi) ile tanımlanması gerekir. Buna göre kontrol noktalarının piksel koordinatları ile resim koordinatları arasındaki ilişki (3.5) bağıntısı ile ifade edilir.

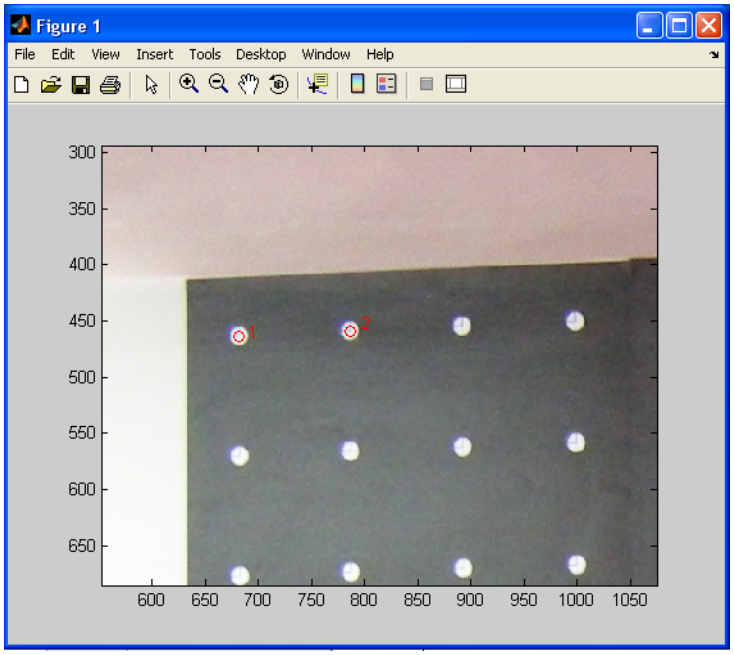
$$x = u - x_o$$
$$y = y_o - v \qquad (3.5)$$



Şekil 3.6. Piksel ve resim koordinat sistemleri

3.3.3. Kontrol noktalarının resim koordinatları

Kontrol noktaları siyah zemin üzerine beyaz olarak işaretlendiği için fotoğraftan kolayca ayırt edilebilmektedir. Kontrol noktalarının resim koordinatlarının okunması için Matlab yazılımı altında kod yazılmıştır. Noktaların piksel koordinatları hedef işaretlerinin orta noktası olarak ölçülmüş (Şekil 3.7) ve dosyaya kaydedilmiştir. Kontrol noktalarının piksel koordinat sisteminde ölçülen koordinatları (3.5) bağıntısı ile resim koordinatlarına dönüştürülmüştür. Resim koordinatlarının distorsiyon düzeltmeleri (3.2) ve (3.4) bağıntıları ile hesaplanmıştır.



Şekil 3.7. Kontrol noktalarının resim koordinatlarının okunması

3.3.4. Yansıma görüntüsü (Intensity image)

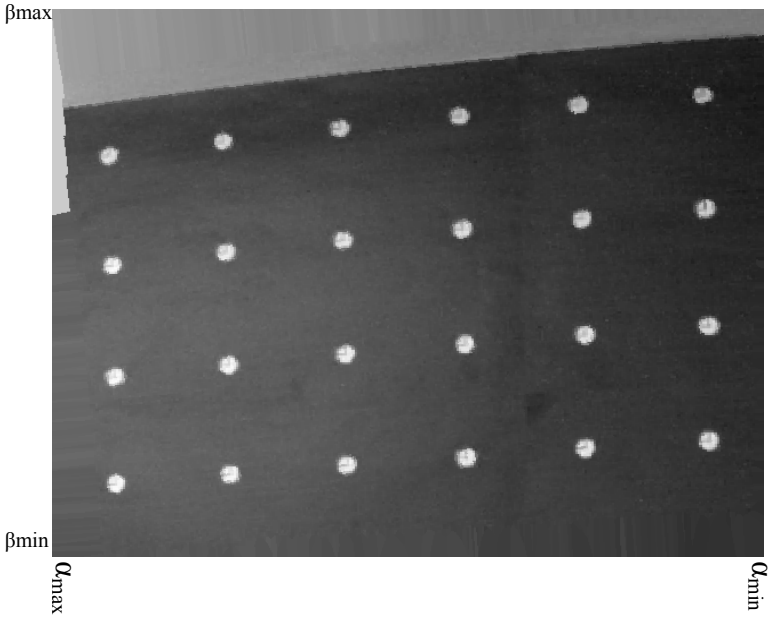
Lazer tarayıcı ölçüleri, tarayıcı aletin tanımlı başlangıç noktasına göre kutupsal koordinatlardır. Ölçülen büyüklükler tarayıcı alet ile nokta arasındaki eğik mesafe (ρ), bu doğrunun tarayıcının x ve y koordinat eksenleri ile yatay ve düşey düzlemde yaptığı açılar (α ve β) ve yansıma değeri (I) dir. Ölçülen noktaya ait doğrultunun aletin x ekseni ile yatay düzlemde yaptığı açı α, y ekseni ile düşey düzlemde yaptığı açı β dır (Şekil 3.2). 2B yansıma görüntüsü (intensity image) bu α, β ve yansıma değerleri (I) ile

oluşturulmuştur (Karel ve Pfeifer, 2009; Deveau ve ark., 2004). Bu görüntü 3B lazer tarama verilerinden oluşturulan 2B fotoğrafik bir görüntüdür. Her lazer tarama noktası yansıma görüntüsünde bir piksele karşılık gelmektedir. Yansıma görüntüsünde her piksel lazer tarayıcı ölçülerinin f(α,β,I) fonksiyonunun bir sonucudur. 2B yansıma görüntüsünün oluşturulmasında işlem sırası şu şekilde olmuştur.

- Lazer tarayıcı ölçüsünün α ve β açılarının maksimum ve minimum değerleri bulunarak oluşturulacak yansıma görüntüsünün sınırları belirlenir. α açısı sağdan sola doğru, β açısı ise aşağıdan yukarı doğru artmaktadır (Şekil 3.2). Buna göre oluşturulacak 2B görüntüde soldan sağa doğru α açısı, aşağıdan yukarıya doğru β açısı artmaktadır (Şekil 3.8).
- Açılar için artış değeri; ortalama 6 metre tarama mesafesi ve 2 milimetre nokta sıklığına karşılık gelen 0.021 grad olarak belirlendi.
- α, β 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. Nokta bulutu görüntüsü ile karşılaştırıldığında detay ve kontrol noktası seçiminin oluşturulan bu 2B görüntü üzerinden kolayca yapılabildiği görülmektedir.



Şekil 3.8. Test alanının lazer tarama ölçüsünden oluşturulan 2B yansıma görüntüsü (intensity image)

3.3.5. Kontrol noktalarının lazer tarayıcı sisteminde koordinatları

Kontrol noktalarının lazer tarayıcı koordinatları yansıma görüntüsü üzerinden okunmuştur. 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 α ve β değerlerinden hesaplanmış, y koordinat değeri ise x,z kareler ağından hesaplanmıştır. Bu koordinatlar seçilen noktalar için yaklaşık koordinatlar olarak kabul edilmiştir. Hedef işaretlerinin çapı (3cm) ve yansıma (I) değerleri kriter olarak belirlenip kontrol noktalarının lazer tarayıcı koordinatları hedef işaretlerinin tam orta nokta noktasından hesaplanmıştır.

3.3.6. Doğrusallık koşulu

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 3.9 da 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 (3.6) bağıntısı ile ifade edilir (Şekil 3.9). Bu bağıntıdan hareketle doğrusallık koşulu eşitlikleri (3.7) elde edilir (Kraus, 2007).

$$\begin{bmatrix} x - x_o \\ y - y_o \\ -c \end{bmatrix}_{Resim} = \frac{1}{\lambda}.\mathbf{R}^T.\left(\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{YLT} - \begin{bmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{bmatrix}\right) + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3.6}$$

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

$$y = y_o - c\frac{r_{12}(X - X_c) + r_{22}(Y - Y_c) + r_{32}(Z - Z_c)}{r_{13}(X - X_c) + r_{23}(Y - Y_c) + r_{33}(Z - Z_c)} + \Delta y = y_o - c\frac{Z_y}{N} + \Delta y \tag{3.7}$$

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

λ :Ölçek katsayısı

$\mathbf{R}_{\omega\varphi\kappa}$:3x3 boyutlu ortogonal dönme matrisi

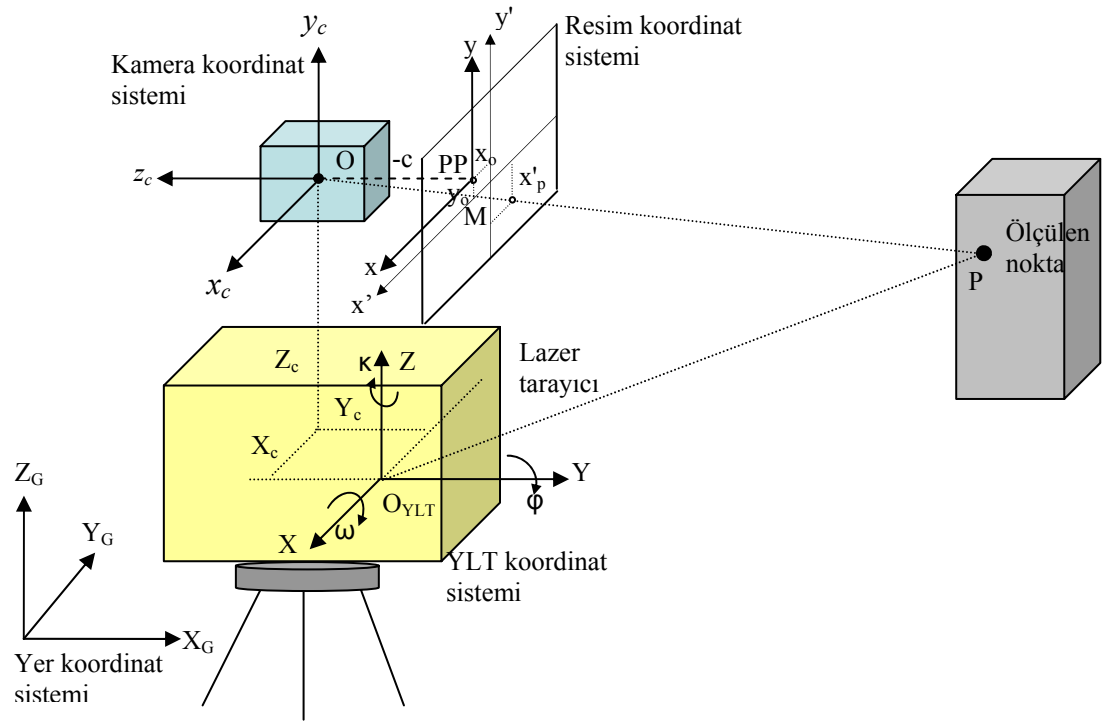
ω,φ,κ :Kamera koordinat sisteminin tarayıcı koordinat sistemine göre dönme açıları

Δx, Δy :Işınsal distorsiyon düzeltmeleridir.

R matrisi elemanları (3.8) ve (3.9) eşitliği ile verilmiştir.

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{14} \\ r_{31} & r_{13} & r_{15} \end{bmatrix} \tag{3.8}$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos\varphi.\cos\kappa & -\cos\varphi.\sin\kappa & \sin\varphi \\ \cos\omega.\sin\kappa + \sin\omega.\sin\varphi.\cos\kappa & \cos\omega.\cos\kappa - \sin\omega.\sin\varphi.\sin\kappa & -\sin\omega.\cos\varphi \\ \sin\omega.\sin\kappa - \cos\omega.\sin\varphi.\cos\kappa & \sin\omega.\cos\kappa + \cos\omega.\sin\varphi.\sin\kappa & \cos\omega.\cos\varphi \end{bmatrix} \tag{3.9}$$



Şekil 3.9. 2B Resim ve 3B lazer tarayıcı koordinat sistemleri ve KKP

Doğrusallık koşulunun bilinmeyenlere göre türevi alınarak lineer hale getirilir ve hata denklemleri (3.10) kurulur. Her resim noktası için iki adet hata denklemi yazılır.

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

$$v_y = \frac{\partial y}{\partial X_c}dX_c + \frac{\partial y}{\partial Y_c}dY_c + \frac{\partial y}{\partial Z_c}dZ_c + \frac{\partial y}{\partial \omega}d\omega + \frac{\partial y}{\partial \varphi}d\varphi + \frac{\partial y}{\partial \kappa}d\kappa - (\bar{y} - y^o) \qquad (3.10)$$

Hata denklemlerinde bilinmeyenlerin türevleri şu şekildedir (3.11).

$$\frac{\partial x}{\partial X_c} = -\frac{c}{N^2}(r_{13}.Z_x - r_{11}.N) \qquad \frac{\partial y}{\partial X_c} = -\frac{c}{N^2}(r_{13}.Z_y - r_{12}.N)$$

$$\frac{\partial x}{\partial Y_c} = -\frac{c}{N^2}(r_{23}.Z_x - r_{21}.N) \qquad \frac{\partial y}{\partial Y_c} = -\frac{c}{N^2}(r_{23}.Z_y - r_{22}.N)$$

$$\frac{\partial x}{\partial Z_c} = -\frac{c}{N^2}(r_{33}.Z_x - r_{31}.N) \qquad \frac{\partial y}{\partial Z_c} = -\frac{c}{N^2}(r_{33}.Z_y - r_{32}.N)$$

$$\frac{\partial x}{\partial \omega} = -\frac{c}{N}(((Y - Y_o).r_{33} - (Z - Z_o).r_{23}).\frac{Z_x}{N}$$

$$\frac{\partial y}{\partial \omega} = -\frac{c}{N}(((Y - Y_o).r_{33} - (Z - Z_o).r_{23}).\frac{Z_y}{N}$$

$$\frac{\partial x}{\partial \varphi} = \frac{c}{N}((Z_x.\cos\kappa - Z_y.\sin\kappa).\frac{Z_x}{N} + N.\cos\kappa)$$

$$\frac{\partial y}{\partial \varphi} = \frac{c}{N}((Z_x.\cos\kappa - Z_y.\sin\kappa).\frac{Z_y}{N} - N.\sin\kappa)$$

$$\frac{\partial x}{\partial \kappa} = -\frac{c}{N}.Z_y \qquad \frac{\partial y}{\partial \kappa} = \frac{c}{N}.Z_x \qquad (3.11)$$

Ölçüler ve bilinmeyen parametreler arasındaki stokastik ilişki lineer olarak (3.12) bağıntısı ile ifade edilir.

$$\mathbf{A.x} = \mathbf{l} \qquad (3.12)$$

Bu bağıntıda **A** katsayılar matrisi, **x** kamera konumunu belirten bilinmeyen parametreler, **l** ise resim koordinatlarından oluşan ölçüler matrisidir. Bilinmeyenler matrisi x en küçük kareler yöntemi ile çözülür (3.13).

$$\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T.\mathbf{A})^{-1}.\mathbf{A}^T.\mathbf{l} \tag{3.13}$$

$$\mathbf{Q_{xx}} = (\mathbf{A}^T.\mathbf{A})^{-1} \tag{3.14}$$

$$\mathbf{V} = \mathbf{A}.\mathbf{x} - \mathbf{l} \tag{3.15}$$

Tüm parametreler için hesaplama doğruluğu (3.16) bağıntısı ile elde edilir. Her bilinmeyen parametrenin hesaplanma doğruluğu ise (3.17) bağıntısı ile bulunur.

$$m_o = \pm\sqrt{\frac{\mathbf{V}^T.\mathbf{V}}{n-u}} \tag{3.16}$$

$$\mathbf{C_{xx}} = \mp m_o\sqrt{\mathbf{Q_{xx}}} \tag{3.17}$$

Burada; n ölçü sayısı, u bilinmeyen parametre sayısıdır.

3.3.7. Kamera konum parametrelerinin hesaplanması

Her kontrol noktasının x ve y resim koordinatları için birer eşitlik yazılarak hata denklemleri oluşturuldu. Bilinmeyenlerin ilk başlangıç değerleri tarayıcının kamera üzerindeki konumuna göre yaklaşık olarak belirlendi ve aşağıdaki değerler alınmıştır.

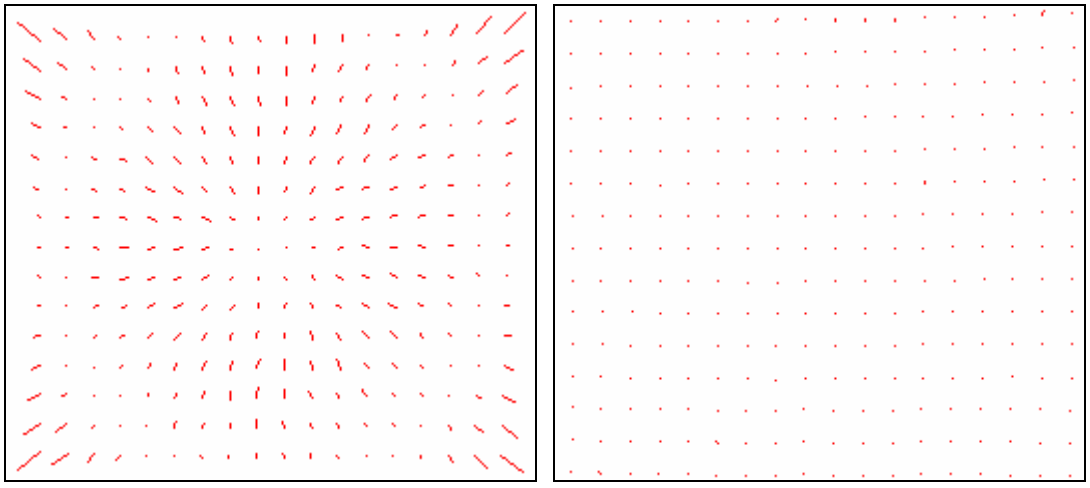
X_c=0 m
Y_c=0 m
Z_c=0.20 m
ω=100 grad
φ=0 grad
κ=0 grad

Her iterasyonda bilinmeyenler için hesaplanan değerler bir sonraki iterasyon için yaklaşık değerler olarak alınarak birkaç iterasyon sonunda KKP m_o=0.53 piksel (3.23 mikron) karesel ortalama hata ile hesaplanmıştır. Hata vektörünün resim üzerindeki

dağılımı Şekil 3.10'da görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi ışınsal distorsiyon en büyük hata kaynağıdır. Parametreleri daha yüksek hassasiyetle hesaplamak için düzeltmeleri 0.50piksel den büyük olan noktalar atılarak KKP 124 nokta ile m_o=0.27 piksel (1.65 mikron) karesel ortalama hata ile hesaplanmıştır. Hesaplanan parametreler ve karesel ortalama hataları Tablo 3.1 de verilmiştir.

Tablo 3.1. Resim çekme makinesinin lazer tarayıcı koordinat sistemine göre kamera konum parametreleri (KKP) ve karesel ortalama hataları

	X_c(m)	Y_c(m)	Z_c(m)	ω(grad)	φ(grad)	κ(grad)
Parametreler	-0.009073	0.069432	0.352643	99.873599	0.251849	0.006490
m_o	0.000632	0.000118	0.000768	0.000148	0.000120	0.000023



Şekil 3.10. Kamera konum parametrelerinin hesaplanmasında resim koordinatlarına distorsiyon düzeltmesi getirilmeden (solda) ve distorsiyon düzeltmesi getirildikten sonraki hatalar (sağda)

3.4. Kamera Konum Parametrelerinin Kontrolü

3.4.1. Kontrol-1: Kontrol noktalarına ait resim koordinatlarının hesaplanması

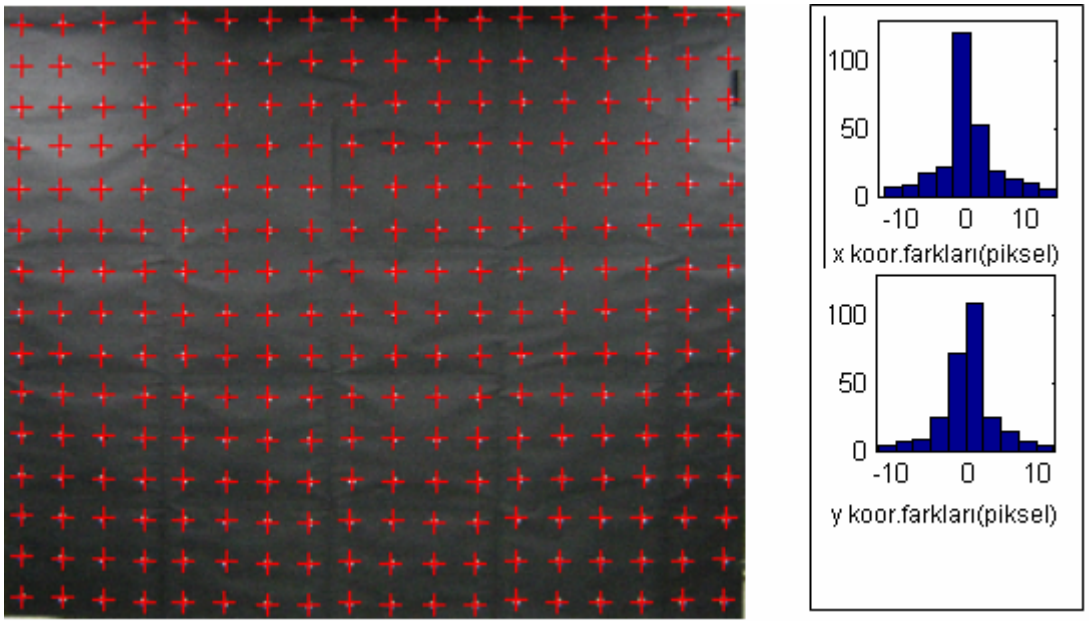
Hesaplanan KKP kullanılarak (3.7) doğrusallık bağıntısı ile kontrol noktalarının lazer tarayıcı koordinatlarından resim koordinatları hesaplandı ve bilinen resim koordinatları ile karşılaştırıldı. Kontrol noktalarının hesaplanan koordinatlarıyla resimdeki görüntüsünün çakışma durumu Şekil 3.11 da görülmektedir. Kontrol noktaların 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.

3.4.2. 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 yasıma değerleri ile oluşturulan görüntüleri karşılaştırıldı ve benzer görüntüler elde edildi (Şekil 3.12). Fotoğrafta tarayıcı noktalarına karşılık gelen renkler KKP ile hesaplandığından bu işlem hesaplanan parametrelerin kontrolüdür.



Şekil 3.11. Kontrol noktalarının lazer tarayıcı koordinatlarından hesaplanan resim koordinatları ve resimdeki görüntüsü ile çakışma durumu. Sağda hesaplanan ve bilinen resim koordinatları arasındaki farkların grafiği



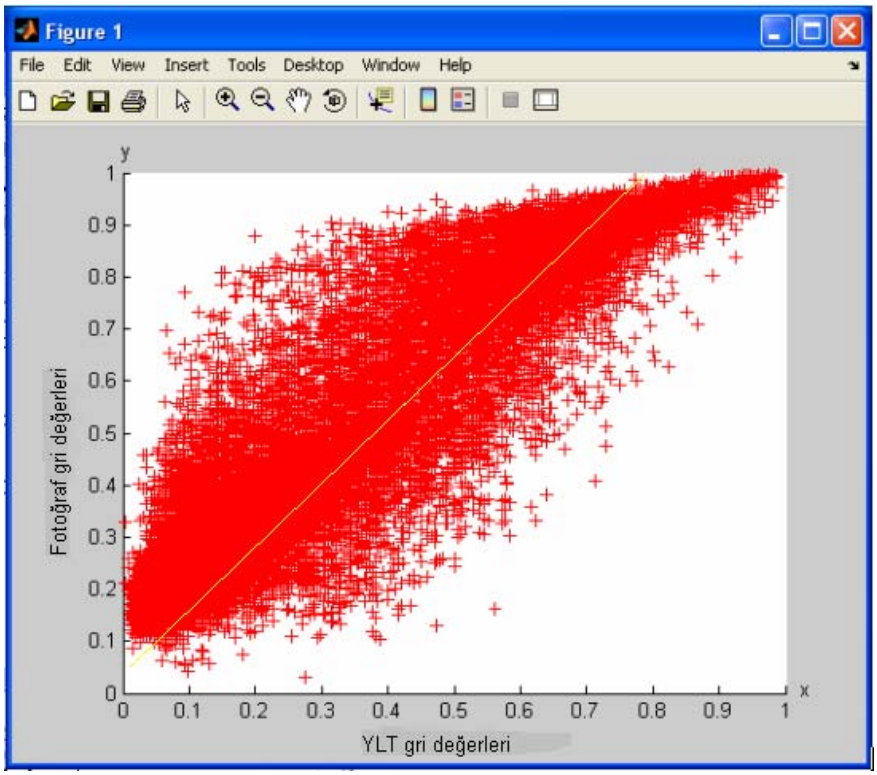
Şekil 3.12. Lazer tarama noktalarının kamera renkleri (solda) ve yansıma değerleri ile görüntüsü (sağda).

3.4.3. Kontrol-3: Yansıma değerleri ve fotoğraf renkleri grafiği

Bu kontrolde fotoğrafın renk değerleri ile lazer tarayıcının yansıma değerleri karşılaştırıldı. Bunun için taranan bütün noktaların fotoğraf renkleri (Nikon D80) ve yansıma değerleri (Ilris 3D) bir grafik üzerinde görüntülendi (Şekil 3.13). Lazer tarama noktalarının doğrusallık 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.

Normal şartlarda parametreler hatasız, lazer tarayıcı yansıma 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 yansıma 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. Şekil 3.13'de ki grafikte noktaların dağılımı y=1.27x+0.033 doğrusunu oluşturmaktadır ve 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 yansımasından ve yukarıda bahsedilen etkilerde kaynaklanmaktadır ve KKP'nin hassasiyeti ile ilişkisi yoktur.



Şekil 3.13. Yansıma değerleri ve fotoğraf renkleri grafiği. Grafikte 0 değeri siyaha 1 beyaza karşılık gelmektedir.

4. NOKTA BULUTLARININ BİRLEŞTİRİLMESİ

Nokta bulutlarının birleştirilmesi, bindirmeli yapılan iki taramadan birisi sabit kabul edilerek diğer nokta bulutunun bu taramanın koordinat sistemine dönüştürülerek birleştirilmesini ifade eder. Bu dönüşüm (4.1) eşitliği ile ifade edilmektedir. Bu eşitlikte ikinci durak noktasından yapılan taramanın koordinatları (S2), referans olarak seçilen birinci taramanın koordinat sistemine (S1) dönüştürülmektedir. Nokta bulutları arasında ölçek farkı olmadığı için ölçek katsayısı 1 olarak alınmaktadır. Burada **R** iki tarama arasındaki dönme açıları ile oluşturulan dönme matrisi, $[X_o\ Y_o\ Z_o]^T$ ikinci taramanın orijininin birinci taramanın koordinat sisteminde koordinatlarıdır.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{S1} = \mathbf{R}.\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{S2} + \begin{bmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{bmatrix} \tag{4.1}$$

Bir cisim için art arda yapılan taramalar referans olarak seçilen taramanın koordinat sistemine ardışık olarak dönüştürülerek birleştirilir. Eğer taramalar başka bir koordinat sisteminde birleştirilecekse bu durumda tarama alanında dönüştürülecek sistemde koordinatları bilinen noktalar tesis etmek gerekir. Nokta bulutları birleştirilip model oluşturulduktan sonra her iki sistemde koordinatı bilinen noktalar yardımıyla jeodezik koordinat sistemi yada başka bir koordinat sistemine dönüşüm yapılabilir (Schuhmacher and Boehm, 2005; Yıldız ve Altuntaş, 2009).

Bu bölümde iki farklı durak noktasından yapılan lazer taramalarının digital kamera görüntülerinin karşılıklı yöneltmesi ile birleştirilmesi anlatılmıştır. Ayrıca, yalnızca bir durak noktasında tarayıcı üzerindeki kamera ile alınan tek resim ile nokta bulutlarının birleştirilmesi ve bir cisim için art arda yapılan lazer taramaları arasındaki dönüşüm parametrelerinin ışın demetleri dengelemesi ile hesaplanması anlatılmıştır. Bu yöntemlerle nokta bulutlarının birleştirilmesi aşağıda alt başlıklar halinde açıklanmıştır.

4.1. İki Lazer Tarama Durak Noktasındaki Fotoğraflar Yardımıyla Nokta Bulutlarının Birleştirilmesi

Bu uygulamada iki farklı durak noktasından yapılan bindirmeli lazer taramaları tarayıcı üzerindeki kamera görüntülerinin karşılıklı yöneltmesi ile birleştirilmektedir.

Eğer her iki durak noktasından bindirmeli olarak alınan fotoğrafların birbirlerine göre konumları ve dönüklükleri bilinirse dönüştürülecek nokta bulutu, KKP ile önce o durak noktasında kamera projeksiyon merkezine buradan da karşılıklı yöneltme parametreleri ile referans nokta bulutuna dönüştürülerek birleştirilebilir. Kamera koordinat sistemlerinin birbirlerine göre konumları resimlerin karşılıklı yöneltmesi ile hesaplanır. Karşılıklı yöneltme fotogrametrik değerlendirmede 3B görüntünün elde edildiği en önemli işlem adımıdır. Karşılıklı yöneltme ile resimler birbirlerine göre çekim anındaki pozisyonlarına getirilirler. Her iki resimde eşlenik en az beş noktada eşdüzlemsellik (koplanarite) koşulu ile ışınlar kesiştirilerek karşılıklı yöneltme parametreleri hesaplanır. Eşlenik noktalara ait ışınların kesiştirilebilmesi için resimlerin birbirlerine göre ötelenmeleri ve döndürülmeleri gerekir. Bu öteleme ve döndürme her iki resim elemanları ile yapılabileceği gibi yalnızca ikinci resim elemanları ile de yapılabilir. Karşılıklı yöneltme sonunda eşlenik noktaların ve izdüşüm merkezlerinin koordinatları model koordinat sisteminde ifade edilir. Model koordinatlarının başlangıcı birinci resmin izdüşüm merkezidir. İkinci resmin izdüşüm merkezi baz doğrultusu üzerindedir. Model koordinatlarının ölçeği seçilen model bazının uzunluğuna bağlı olarak değişmektedir. Herhangi bir kenarın modeldeki uzunluğunun gerçek değerine oranı ile ya da iki noktanın lazer tarayıcı koordinatları ile model ölçeklendirilebilir (Al-Manasir ve Fraser, 2006a; Sheng, 2004). Karşılıklı yöneltme için bölüm 4.5 de açıklanacak yöntemlerden birisi kullanılabilir. Karşılıklı yöneltmede birinci resim sabit kabul edilirse diğer resmin izdüşüm merkezinin model koordinat sisteminde koordinatları b_x,b_y,b_z ve dönüklüğü $\omega_2,\varphi_2,\kappa_2$ olur. Buna göre birinci durak noktasından yapılan tarama sabit kalarak karşılıklı yöneltme parametreleri ile nokta bulutlarının birleştirilmesi şu şekilde yapılmaktadır (Şekil 4.1).

1. İkinci durak noktasından yapılan taramanın koordinatları (S2) (4.2) bağıntısı ile bu durak noktasında tarayıcı üzerindeki kamera koordinat sistemine (C2) dönüştürülür. Burada $\mathbf{R}_1$, KKP ile hesaplanan dönme matrisi, X_c,Y_c,Z_c kamera izdüşüm merkezinin tarayıcı koordinat sistemine göre koordinatlarıdır.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{C2} = \mathbf{R}_1^{-1}.\left(\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{S2} - \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} \right) \tag{4.2}$$

2. İkinci durak noktasında kamera koordinat sistemine (C2) dönüştürülen lazer tarama koordinatları, karşılıklı yöneltmede ikinci resim için hesaplanan dönme açıları ile döndürülür ve b_x,b_y,b_z kadar ötelenerek birinci durak noktasında kamera koordinat sistemine (C1) dönüştürülür.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{C1} = \mathbf{R}_2 . \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{C2} - \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} \tag{4.3}$$

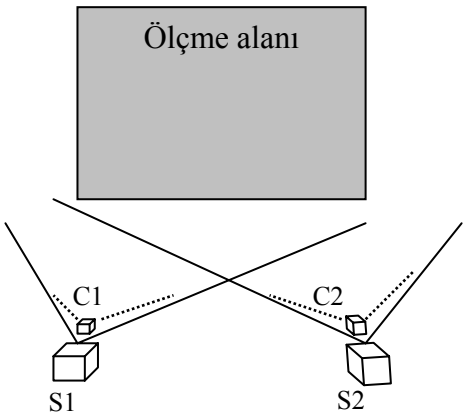
3. Birinci durak noktasında kamera koordinat sistemindeki tarama (4.4) bağıntısı ile bu durak noktasında lazer tarayıcı koordinat sistemine (S1) dönüştürülerek birinci durak noktasından yapılan tarama ile birleştirilir.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{S1} = \mathbf{R}_1 . \left(\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{C1} + \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} \right) \tag{4.4}$$

Bu işlemlerin tamamı tek bir eşitlikle aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{S1} = \mathbf{R}_1 . \left[\mathbf{R}_2 . \left[\mathbf{R}_1^{-1} \left[\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{S2} - \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} \right] \right] - \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} \right] \tag{4.5}$$

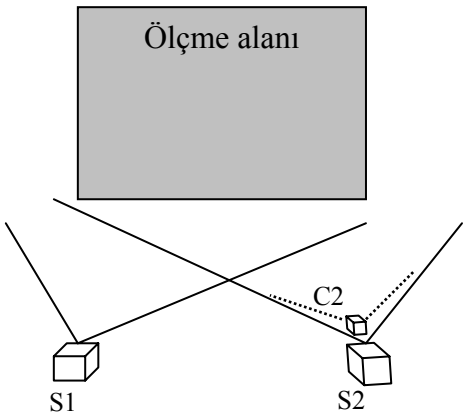
Burada; $\mathbf{R}_1$ KKP'nin dönme açılarıyla (ω,φ,κ) hesaplanan dönme matrisi, $\mathbf{R}_2$ karşılıklı yöneltmede ikinci resmin dönme açıları $(\omega_2,\varphi_2,\kappa_2)$ ile hesaplanan dönme matrisidir. Model ölçeklendirildikten sonra b_x,b_y,b_z ikinci durak noktasındaki kameranın izdüşüm merkezi koordinatlarıdır. X_c,Y_c,Z_c kamera izdüşüm merkezinin tarayıcı koordinat sistemine göre koordinatlarıdır. Tarayıcının başlangıç konumundan (kamera çekim konumu) γ açısı kadar dönük olarak yapılan taramalar önce başlangıç konumuna dönüştürülür daha sonra (4.5) bağıntısı ile dönüşüm uygulanır.



Şekil 4.1. Karşılıklı yöneltme ile nokta bulutlarının birleştirilmesi için ölçme planı

4.2. Tek Lazer Tarama Durak Noktasındaki Fotoğraf Yardımıyla Nokta Bulutlarının Birleştirilmesi

Bu yöntemde lazer tarayıcı üzerindeki digital kameradan alınan fotoğraflardan yalnızca bir durak nokta noktasındaki fotoğraf ile nokta bulutları birleştirilmektedir. Ölçme alanı iki ayrı durak noktasından bindirmeli olarak taranmakta ve aynı zamanda tarayıcı üzerindeki kamera ile fotoğrafı çekilmektedir (Şekil 4.2). Nokta bulutlarının birleştirilmesinde taramalardan birisi sabit kalmakta diğer tarama bu taramanın koordinat sistemine dönüştürülmektedir. Nokta bulutlarının birleştirilmesi için herhangi bir durak noktasından alınan fotoğraf kullanılabilir. Dönüştürülecek durak noktasında tarayıcı üzerindeki kameranın konumu diğer durak noktasından yapılan ve referans olarak seçilen taramanın koordinat sisteminde hesaplanır. Kameranın referans nokta bulutuna göre konumu doğrusallık koşulu bağıntısı kullanılarak uzay geriden kestirme yöntemi ile hesaplanır. Taramalar ortak alanlar oluşturduğu için hesaplama için yeterli sayıda nokta bulunabilecektir. Hesaplama için üç nokta yeterli olmasına rağmen en az 10 nokta ile hesaplama yapılmalıdır. Örneğin birinci durak noktasından yapılan lazer taramasını sabit (referans) kabul edersek ikinci durak noktasından yapılan lazer taramasının referans nokta bulutunun koordinat sistemine dönüşümü için işlem sırası şu şekildedir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. Tek resim ile nokta bulutlarının birleştirilmesinde ölçme planı

1. Önce (3.7) doğrusallık bağıntısı ile birinci taramanın koordinat sistemine (S1) göre ikinci durak noktasındaki kameranın konumu yani izdüşüm merkezi koordinatları ve dönme açıları ($X_{c2},Y_{c2},Z_{c2},\omega_{c2},\varphi_{c2},\kappa_{c2}$) hesaplanır.
2. (4.6) bağıntısı ile dönüştürülecek nokta bulutu (S2), KKP ($X_c,Y_c,Z_c,\omega,\varphi,\kappa$) ile o durak noktasındaki kamera koordinat sistemine dönüştürülür. Burada $\mathbf{R}_1$, KKP ile hesaplanan dönme matrisidir.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{C2} = \mathbf{R}_1 . \left(\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{S2} - \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} \right) \tag{4.6}$$

3. İkinci durak noktasında kamera koordinat sistemine (C2) dönüştürülen tarama birinci maddede hesaplanan parametrelerle ($X_{c2},Y_{c2},Z_{c2},\omega_{c2},\varphi_{c2},\kappa_{c2}$) referans olarak seçilen birinci taramanın koordinat sistemine (S1) dönüştürülerek birleştirilir. Burada $\mathbf{R}_2$, ($\omega_{c2},\varphi_{c2},\kappa_{c2}$) açılarıyla hesaplanan dönme matrisidir.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{S1} = \mathbf{R}_2 . \left(\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{C2} + \begin{bmatrix} X_{c2} \\ Y_{c2} \\ Z_{c2} \end{bmatrix} \right) \tag{4.7}$$

Yukarıdaki işlemler toplu olarak ele alınırsa tek resimle nokta bulutlarının birleştirilmesi (4.8) eşitliği ile ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{S1} = \mathbf{R}_2 \cdot \left(\mathbf{R}_1 \cdot \left(\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{S2} - \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} X_{c2} \\ Y_{c2} \\ Z_{c2} \end{bmatrix} \right) \tag{4.8}$$

Bu eşitlikte; $[X_{c2}\ Y_{c2}\ Z_{c2}]^T$, birinci adımda hesaplanan ikinci durak noktasında tarayıcı üzerindeki kameranın izdüşüm merkezinin birinci durak noktasından yapılan taramanın koordinat sistemine göre koordinatları, $[X_c\ Y_c\ Z_c]^T$ ise KKP ile bilinen, kamera izdüşüm merkezinin ikinci durak noktasından yapılan taramanın koordinat sistemine göre koordinatlarıdır. $\mathbf{R}_1$, KKP'nin dönme açıları ile hesaplanan dönme matrisi, $\mathbf{R}_2$ ise birinci adımda hesaplanan dönüklük açıları ($\omega_{c2},\varphi_{c2},\kappa_{c2}$) ile hesaplanan dönme matrisidir. Bu yöntemin başarılı bir şekilde uygulanabilmesi birinci maddede bahsedilen kamera konumunun hassas olarak hesaplanmasına bağlıdır. Kamera konumu tarama alanında tesis edilen kontrol noktaları ile hesaplanır. Ya da resimden ve nokta bulutundan görüntü eşleme teknikleri ile çıkarılan noktalar yardımıyla da kameranın konumu hesaplanabilir.

4.3. Işın Demetleri Dengelemesi ile Nokta Bulutlarının Birleştirilmesi

Bir cisim için ardışık olarak yapılan ölçülerde, bütün lazer tarama durak noktalarından alınan fotoğraflar ışın demetleri dengelemesi ile dengelenerek nokta bulutları arasındaki dönüşüm parametreleri hesaplanabilir. Bazı durumlarda objenin konumundan ve yapısından dolayı lazer taramaları tam olarak bindirmeli yapılamayabilir. Bu durumda kamera tarayıcıdan sökülüp serbest elle bindirme alanın ilave fotoğrafları çekilerek ışın demetleri dengelemesine dahil edilebilir (Şekil 5.5). Işın demetleri ile kamera izdüşüm merkezlerinin referans nokta bulutuna göre koordinatları ve dönüklükleri hesaplanır. Dengeleme için gerekli izdüşüm merkezlerinin yaklaşık koordinatları ve dönüklükleri referans alınan nokta bulutundan başlanarak ortak tarama alanında her iki nokta bulutundan seçilebilen noktalarla sırasıyla hesaplanır. Fotoğraflar arasında yeterli sayıda bağ noktası işaretlenir. Dengeleme sonunda hesaplanan parametreler kullanılarak (4.8) formülü ile nokta bulutları birleştirilir.

4.4. Nokta Bulutlarının Renklendirilmesi

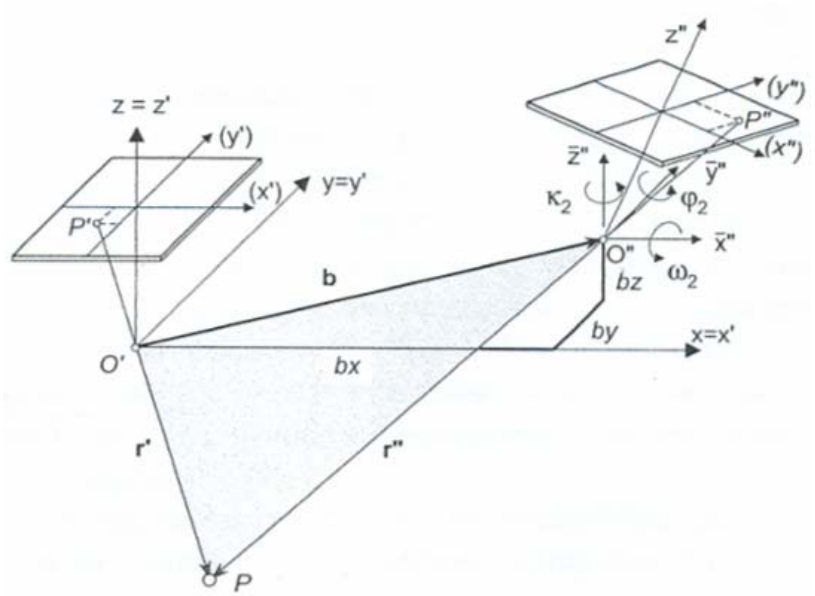
Lazer tarayıcının dahili kamera görüntüsünden taranan noktalar için renk kaydı yapılmaktadır. Ancak fotoğraf yeterli netlikte değilse nokta bulutu görüntüsü istenilen netlikte olmayacaktır. Bu durumda nokta bulutu görüntüsü tarayıcıya takılan kameranın foğrafı ile yeniden renklendirilebilir. Böylece nokta bulutundan detay seçimi daha kolay yapılabilir (Kadobayashi ve ark.,2004). Bunun için 3B lazer tarayıcı koordinatlarına karşılık gelen 2B resim koordinatlarının hesaplanması gerekir. Bu koordinat dönüşümü (3.7) doğrusallık bağıntısı ile yapılır. Doğrusallık koşulu resim ve tarayıcı koordinatları arasındaki dönüşüm parametreleri yani KKP kullanılarak uygulanır. Noktaların resim üzerindeki yerinin tam olarak belirlenebilmesi için distorsiyon hatasının da mutlaka hesaba katılması gerekir. Lazer tarayıcı noktasına karşılık gelen resim koordinatları hesaplandıktan sonra resimde o noktanın rengi lazer tarayıcı noktasının renk değeri olarak atanır. Sonuçta daha iyi renklendirilmiş nokta bulutu görüntüsü elde edilir.

4.5. Karşılıklı Yöneltme

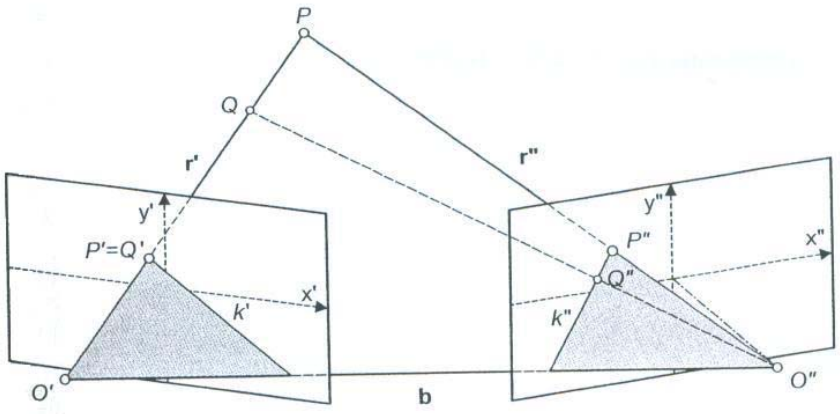
4.5.1. Yalnızca ikinci resim elemanları (b_y,b_z,ω_2,φ_2,κ_2) ile karşılıklı yöneltme

Bu yöntemde bindirmeli çekilen resimlerden birisi sabit kalır diğer resim birinci resme göre çekim anındaki pozisyon oluşacak şekilde döndürülür ve ötelenir (Luhmann ve ark. 2006). xyz model koordinat sistemi eksenleri birinci resmin (sol resim) koordinat sistemine paralel olacak şekilde birinci resmin izdüşüm merkezine yerleştirilir. İkinci resim çekim anındaki pozisyon oluşacak şekilde üç eksen etrafında döndürülür ve ötelenir.

O_1 ve O_2 izdüşüm merkezlerini birleştiren baz vektörü b_x,b_y,b_z bileşenleri ile ifade edilir (Şekil 4.3). Doğru bir karşılıklı yöneltmede bütün noktalar için homolog noktalara ait ışın çiftleri ve baz vektörü aynı düzlem içindedir. O_2 izdüşüm merkezini baz doğrusu boyunca O_1 izdüşüm merkezine doğru kaydırırsak homolog ışınlar yine bir noktada kesişirler ve baz vektörü ile aynı düzlemde kalırlar. Ancak bu durumda model ölçeği değişmiştir. Model koordinat sistemi baz uzunluğuna bağlı olarak ölçeklendirilir. Genellikle b_x=1 olarak alınır. Bu durumda karşılıklı yöneltme için geriye kalan beş bilinmeyen bileşenin (b_y,b_z,ω_2,φ_2,κ_2) hesaplanması gerekir.



Şekil 4.3. Model koordinat sistemi ve karşılıklı yöneltme (sol resim sabit) (Luhmann ve ark., 2006)



Şekil 4.4. Eşdüzlemsellik koşulu (Luhmann ve ark., 2006)

Çözüm için birinci resmin izdüşüm merkezi (O_1) ile çakışık ve +x ekseni birinci resmin +x ekseni ile çakışık model koordinat sistemi tanımlanır. İkinci resim, çekim anındaki pozisyon oluşacak şekilde döndürülür ve ötelenir (Şekil 4.3). Bu durumda model koordinat sistemine göre bilinmeyen dış yöneltme parametreleri şu şekilde olacaktır;

$x_{01} = 0$ $\quad \omega_1 = 0$

$y_{01} = 0$ $\quad \varphi_1 = 0$

$z_{01} = 0$ $\quad \kappa_1 = 0$

$x_{02} = b_x$ $\quad \omega_2$

$y_{02} = b_y$ $\quad \varphi_2$

$z_{02} = b_z$ $\quad \kappa_2$

Karşılıklı yöneltme bilinmeyenlerinin çözümü için obje noktası P ve izdüşüm merkezleri O_1,O_2 den geçen düzlemden yararlanılır. Bu düzlemde **b**, **r'** ve **r''** ile tanımlanan düzlem epipolar düzlemdir ve aynı zamanda obje noktasının resimler üzerindeki izdüşüm noktaları p' ve p'' nü de içerir.

Karşılıklı yöneltmesi yapılmış bir modelde **r'** ve **r''** vektörleri obje noktasında kesişirler. Bütün eşlenik noktalar için eşdüzlemsellik koşulu (4.9) yazılabilir (Şekil 4.3, Şekil 4.4). Sonuç olarak bilinmeyen beş karşılıklı yöneltme parametresini hesaplayabilmek için her iki resimde en az beş eşlenik nokta gerekir. Düzlem eşitliği ile bütün homolog noktalardaki paralakslar minimum yapılır.

Epipolar düzlemde vektör çarpımlarından yararlanılarak

$$(\mathbf{b}\mathrm{x}\mathbf{r'}).\mathbf{r''} = 0 \tag{4.9}$$

yazılabilir.

b :Baz vektörü (b_x,b_y,b_z bileşenleri ile tanımlı)

r' :Eşlenik noktanın sol resim koordinatları ile tanımlanan vektör

r'' :Eşlenik noktanın sağ resim koordinatları ile tanımlanan vektör.

(4.9) eşitliği determinant formunda yazılırsa

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & x' & \bar{x}'' \\ b_y & y' & \bar{y}'' \\ b_z & z' & \bar{z}'' \end{vmatrix} = 0 \tag{4.10}$$

Burada;

$$\begin{bmatrix} \bar{x}'' \\ \bar{y}'' \\ \bar{z}'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{bmatrix} \tag{4.11}$$

$$\mathbf{r''} = \mathbf{A}.\mathbf{x''} \tag{4.12}$$

Burada $a_{11},a_{12},\ldots$ ile tanımlanan **A** matrisi ikinci resim için $\omega_2,\varphi_2,\kappa_2$ dönme açıları ile tanımlanan dönme matrisidir. $z'=-c_1$, $z''=-c_2$ alınır. Bütün eşlenik noktalar için (4.10) eşitliği yazılabilir.

Bilinmeyenler en küçük kareler yöntemi ile iteratif olarak hesaplanır. Eşdüzlemsellik koşulundan hareketle her nokta için aşağıdaki hata denklemi yazılabilir.

$$v_\Delta = \frac{\partial\Delta}{\partial b_y} db_y + \frac{\partial\Delta}{\partial b_z} db_z + \frac{\partial\Delta}{\partial\omega_2} d\omega_2 + \frac{\partial\Delta}{\partial\varphi_2} d\varphi_2 + \frac{\partial\Delta}{\partial\kappa_2} d\kappa_2 \tag{4.13}$$

En küçük kareler yöntemi ile hesaplama için (4.13) eşitliğinde bilinmeyenlerin ilk yaklaşık değerleri gerekir. Bütün bilinmeyenler için ilk yaklaşık değerler sıfır olarak alınabilir.

$$b_y^o=b_z^o=\omega_2^o=\varphi_2^o=\kappa_2^o=0 \tag{4.14}$$

Hata denkleminde bilinmeyenlerin türevleri;

$$\frac{\partial\Delta}{\partial b_y}=\begin{vmatrix}0 & x' & \bar{x}''\\ 1 & y' & \bar{y}''\\ 0 & z' & \bar{z}''\end{vmatrix},\quad \frac{\partial\Delta}{\partial b_z}=\begin{vmatrix}0 & x' & \bar{x}''\\ 0 & y' & \bar{y}''\\ 1 & z' & \bar{z}''\end{vmatrix},\quad \frac{\partial\Delta}{\partial\omega_2}=\begin{vmatrix}1 & x' & 0\\ b_y & y' & -\bar{z}''\\ b_z & z' & \bar{z}''\end{vmatrix},$$

$$\frac{\partial\Delta}{\partial\varphi_2}=\begin{vmatrix}1 & x' & -\bar{y}''\sin\omega_2+\bar{z}''\cos\omega_2\\ b_y & y' & \bar{x}''\sin\omega_2\\ b_z & z' & -\bar{x}''\cos\omega_2\end{vmatrix},$$

$$\frac{\partial\Delta}{\partial\kappa_2}=\begin{vmatrix}1 & x' & -\bar{y}''\cos\omega_2\cos\varphi_2-\bar{z}''\sin\omega_2\cos\varphi_2\\ b_y & y' & \bar{x}''\cos\omega_2\cos\varphi_2-\bar{z}''\sin\varphi_2\\ b_z & z' & \bar{x}''\sin\omega_2\cos\varphi_2+\bar{y}''\sin\varphi_2\end{vmatrix} \tag{4.15}$$

dir. Bilinmeyenlerin değerlerinde önemli bir değişiklik olmayıncaya kadar iterasyona devam edilir. Parametrelerin hesaplanmasında oluşacak kalıntı hatalar model uzayında **r'** ve **r''** ışınlarının kesişme noktasında paralaks oluşturur. Paralakslar hesaplanan model koordinatları kullanılarak yöneltme parametrelerinin doğruluklarını analiz için kullanılır (Luhmann ve ark., 2006).

4.5.2. Yalnızca döndürme parametreleri ($\varphi_1,\kappa_1,\omega_2,\varphi_2,\kappa_2$) ile karşılıklı yöneltme

Bu yöntemde model koordinat sistemi birinci resmin projeksiyon merkezinde ve x ekseni ikinci resmin izdüşüm merkezi doğrultusundadır. Koordinat sistemi sağ el kuralına göre oluşturulmaktadır. Buna göre birinci resmin x ekseni etrafındaki dönüklüğü $\omega_1=0$ olduğuna göre diğer beş dönme açısı ile karşılıklı yöneltme yapılmaktadır. Bu yöntemde her iki resme ait yöneltme açılarından oluşan karşılıklı yöneltme bilinmeyenleri en az beş eşlenik nokta yardımıyla hesaplanmaktadır. En küçük kareler yöntemiyle çözüm yapıldığı için bilinmeyenlerin ($\varphi_1,\kappa_1,\omega_2,\varphi_2,\kappa_2$) yaklaşık değerlerinin önceden hesaplanması gerekir. Yaklaşık değerler aşağıdaki formülle hesaplanır (Kraus, 2007).

$$v_{p_n} = -x'd_{\kappa 1} + x''d_{\kappa 2} + \frac{x'y'}{c}d_{\varphi 1} - \frac{x''y''}{c}d_{\varphi 2} + (c + \frac{y''^2}{c})d_{\omega 2} - p_n \tag{4.16}$$

$$p_n = y' - y'' \tag{4.17}$$

İzdüşüm merkezleri ve obje noktasından geçen düzlem denklemi aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir (Kraus, 2007).

$$D = \begin{vmatrix} 1 & x' & x'' \\ 0 & y' & y'' \\ 0 & z' & z'' \end{vmatrix} = 0 \tag{4.18}$$

$$\mathbf{p}_1 = \mathbf{R}_{1(\omega_1=0,\varphi_1,\kappa_1)} \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ -c \end{pmatrix},\ \mathbf{p}_2 = \mathbf{R}_{2(\omega_2,\varphi_2,\kappa_2)} \begin{pmatrix} x'' \\ y'' \\ -c \end{pmatrix} \tag{4.19}$$

Bu eşitlikten yalnızca dönme açıları ile karşılıklı yöneltme parametrelerinin hesaplanabilmesi için bilinmeyenlere göre türev alınıp hata denklemi oluşturulur. Burada $\mathbf{p}_1$ ve $\mathbf{p}_2$ sırasıyla P noktasının birinci ve ikinci resim koordinatları vektörüdür.

$$v_\Delta = \frac{\partial D}{\partial \varphi_1}d\varphi_1 + \frac{\partial D}{\partial \kappa_1}d\kappa_1 + \frac{\partial D}{\partial \omega_2}d\omega_2 + \frac{\partial D}{\partial \varphi_2}d\varphi_2 + \frac{\partial D}{\partial \kappa_2}d\kappa_2 + D \tag{4.20}$$

$$D = y'z'' - y''z' \tag{4.21}$$

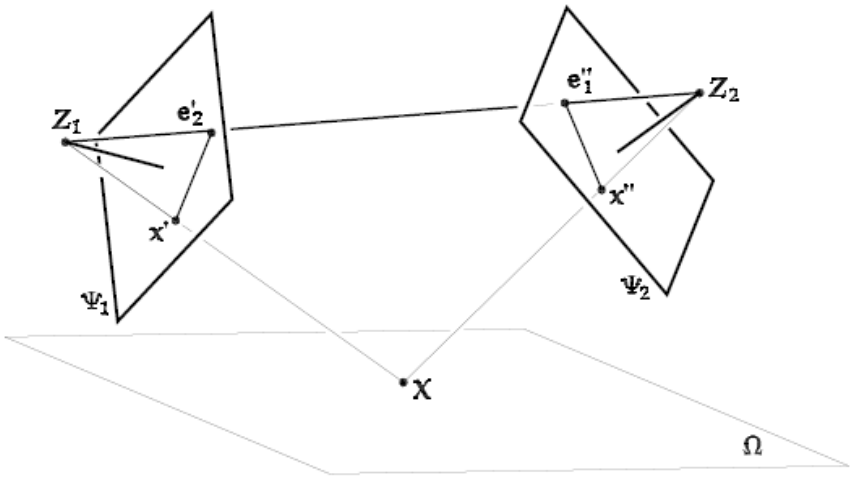
Her eşlenik nokta için bir hata denklemi yazılır. Beş bilinmeyen beş noktada yazılacak eşdüzlemsellik koşulu ile çözülür. Nokta sayısı beşten fazla olursa en küçük kareler yöntemi ile bilinmeyenler çözülür. $\mathbf{R}_1$ ve $\mathbf{R}_2$ dönme matrisleri ω,φ,κ açıları ile (3.9) eşitliği yardımıyla hesaplanır.

Hata denkleminde bilinmeyenlerin türevleri şu şekildedir.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial D}{\partial \omega_2} &= y''y' + z''z' \\
\frac{\partial D}{\partial \varphi_2} &= -\cos(\omega_2)x''y' - \sin(\omega_2)x''z' \\
\frac{\partial D}{\partial \kappa_2} &= (x''r_{2,32} - y''r_{2,31})y' - (x''r_{2,22} - y''r_{2,21})z' \\
\frac{\partial D}{\partial \varphi_1} &= x'y'' \\
\frac{\partial D}{\partial \kappa_1} &= (x'r_{1,22} - y'r_{1,21})z'' - (x'r_{1,32} - y'r_{1,31})y''
\end{aligned} \tag{4.22}$$

4.5.3. Karşılıklı yöneltme için alternatif yöntem

Alternatif yöntemde, karşılıklı yöneltme parametrelerinin hesaplanması için iç yöneltme parametrelerinin bilinmesi gerekmez. Karşılıklı yöneltmenin en genel hesaplama yöntemidir. Bu yöntem özellikle bilgisayar teknolojisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Diğer yöntemlerden farklı olarak en az 8 eşlenik nokta ile çözüm yapılır (Ressl, 2003; Kraus, 2007).



Şekil 4.5. Obje noktası ve resim düzleminde eşlenik görüntüleri (Ressl, 2003)

$$\mathbf{R}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},\ \mathbf{Z}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{4.23}$$

$$\mathbf{p}_1 = \mathbf{C}_1.\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix},\ \mathbf{p}_2 = \mathbf{R}_2.\mathbf{C}_2.\begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ 1 \end{bmatrix} \tag{4.24}$$

$\mathbf{R}_1$, $\mathbf{R}_2$ dönme matrisleri, $\mathbf{Z}_1$, $\mathbf{Z}_2$ projeksiyon merkezlerinin model koordinatları (Şekil 4.5), $\mathbf{p}_1$ ve $\mathbf{p}_2$, P noktasının birinci ve ikinci resimdeki karşılıklarıdır. x', y' ve x'', y'' sırasıyla P noktasının birinci ve ikinci resim koordinatlarıdır.

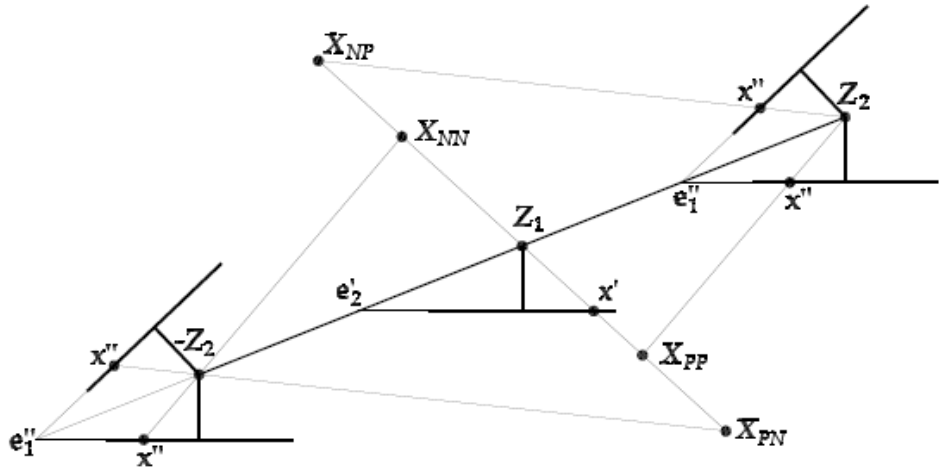
Eşlenik her nokta için bir hata denklemi yazılarak en küçük kareler yöntemi ile ana matris (**F** matris) hesaplanır.

$$v = x'.x''.f_{11} + x'.y''.f_{12} + x'.f_{13} + y'.x''.f_{21} + y'.y''.f_{22} + y'.f_{23} + x''.f_{31} + y'.f_{32} = -1 \tag{4.25}$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & 1 \end{bmatrix} = 0 \tag{4.26}$$

Daha sonra esas matris (**E**) hesaplanır.

$$\mathbf{E} = \mathbf{C}_1^{-T}.\mathbf{F}.\mathbf{C}_2^{-1} \tag{4.27}$$



Şekil 4.6. Alternatif yöntemle iki resmin karşılıklı yöneltmesinde izdüşüm merkezlerinin birbirlerine göre ve resim dönüklüklerinin birbirlerine göre konumuna bağlı olarak dört farklı çözüm kombinasyonu. Doğru çözüm her iki izdüşüm merkezinden X_{pp} nin pozitif izdüşümle elde edildiği çözüm kombinasyonudur (Ressl, 2003).

$$\mathbf{C}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -x_o' \\ 0 & 1 & -y_o' \\ 0 & 0 & -c \end{bmatrix}, \mathbf{C}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -x_o'' \\ 0 & 1 & -y_o'' \\ 0 & 0 & -c \end{bmatrix} \tag{4.28}$$

x_o', y_o', x_o'', y_o'' ; sırasıyla birici ve ikinci resmin asal nokta koordinatlarıdır. **E** matrisinin singuler değer ayrışımı yapılır.

$$\mathbf{E} = \mathbf{U}.\mathbf{S}.\mathbf{V}^T \tag{4.29}$$

Singuler değer ayrışım matrisleri **U**,**S**,**V** 3x3 boyutludur. Birinci resim sabit kalarak diğer resim için $\mathbf{Z}_2=[b_x\ b_y\ b_z]^T$ matrisi hesaplanır. $\mathbf{Z}_2$, **U** matrisinin 3.sütun elemanlarından oluşan vektördür ve ikinci resmin konumuna göre iki farklı şekilde hesaplanır. İkinci resmin birinci resme göre sağda yada solda olması durumları (Şekil 4.6) için $\mathbf{Z}_2$ vektörü aşağıdaki gibi olur.

İkinci resim sağda → $\mathbf{Z}_2$ = **U** matrisinin 3. sütun vektörü

İkinci resim solda → $\mathbf{Z}_2$ = **-U** matrisinin 3. sütun vektörü

$\mathbf{Z}_2$ ye bağlı olarak ikinci resim için $\mathbf{R}_2$ dönme matrisi hesaplanır. $\mathbf{R}_2$ için de ikinci resmin alım ekseninin birinci resimle aynı ve ters yönlü olmasına göre iki değişik durum vardır ve şu şekilde hesaplanır.

$$\mathbf{R}_2^{'} = \mathbf{U}.\mathbf{W}.\mathbf{V}^T \ , \ \mathbf{R}_2^{''} = \mathbf{U}.\mathbf{W}^T.\mathbf{V}^T \tag{4.30}$$

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.31}$$

Her iki halde de

$$\det(\mathbf{R}_2^{'}) < 0 \rightarrow \mathbf{R}_2^{'} = (-1) * \mathbf{R}_2^{'} \tag{4.32}$$

$$\det(\mathbf{R}_2^{''}) < 0 \rightarrow \mathbf{R}_2^{''} = (-1) * \mathbf{R}_2^{''} \tag{4.33}$$

dir. Bu durumda $\mathbf{Z}_2$ ve $\mathbf{R}_2$ ye göre dört farklı kombinasyon oluşur.

$$\begin{aligned} &\text{İkinci resim sağda} \rightarrow +\mathbf{U}_3 \Rightarrow \mathbf{R}_2^{'} = \mathbf{U}.\mathbf{W}.\mathbf{V}^T \\ &\text{İkinci resim sağda} \rightarrow +\mathbf{U}_3 \Rightarrow \mathbf{R}_2^{''} = \mathbf{U}.\mathbf{W}^T.\mathbf{V}^T \\ &\text{İkinci resim solda} \rightarrow -\mathbf{U}_3 \Rightarrow \mathbf{R}_2^{'} = \mathbf{U}.\mathbf{W}.\mathbf{V}^T \\ &\text{İkinci resim solda} \rightarrow -\mathbf{U}_3 \Rightarrow \mathbf{R}_2^{''} = \mathbf{U}.\mathbf{W}^T.\mathbf{V}^T \end{aligned} \tag{4.34}$$

Toplam dört farklı durum için ölçek faktörleri (μ_1 ve μ_2) hesaplanır. Hangi çözümde her iki ölçek de pozitif ise $\mathbf{Z}_2$ ve $\mathbf{R}_2$ o çözümden alınır. Her eşlenik nokta için aşağıdaki denklem sistemi kurulur ve çözüm yapılır.

$$\overrightarrow{Z_1P} = \mu_1.\mathbf{C}_1.\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{Z}_2 + \mu_2.\mathbf{R}_2.\mathbf{C}_2.\begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ 1 \end{bmatrix} \tag{4.35}$$

Bu denklemde bilinmeyenler μ_1 ve μ_2 dir. $\mathbf{Z}_2$ nin ve $\mathbf{R}_2$ nin ikişer farklı durumları için çözüm yapılır. Her durum için μ_1 ve μ_2 en küçük kareler yöntemi ile hesaplanır. Her çözümden μ_1 ve μ_2 için farklı değerler elde edilir.

$$\mu_1 > 0 \text{ ve } \mu_2 > 0$$
$$\mu_1 < 0 \text{ ve } \mu_2 < 0$$
$$\mu_1 > 0 \text{ ve } \mu_2 < 0$$

$$\mu_1 < 0 \text{ ve } \mu_2 > 0$$

Bu çözümlerden $\mu_1>0$ ve $\mu_2>0$ çözümü doğru çözümdür ve $\mathbf{Z}_2$ ve $\mathbf{R}_2$ nin bu çözümlerdeki değerleri alınır (Ressl, 2003).

4.5.4. Model koordinatlarının hesaplanması

Bir noktanın model koordinatları ile o noktanın resim koordinatları arasında aşağıdaki doğrusallık bağıntısı vardır. Bu bağıntının bilinmeyen model koordinatları X,Y,Z e göre türevleri alınarak en küçük kareler yöntemi ile iteratif olarak X,Y,Z model koordinatları her iki resimden hareketle hesaplanabilir (Kraus, 2007). İterasyon için bilinmeyenlerin ilk yaklaşık değerlerinin hesaplanması gerekir.

$$x_1 = -c\frac{Z_{x1}}{N_1} = -c\frac{r_{1,11}(X^o - X_{01}) + r_{1,21}(Y^o - Y_{01}) + r_{1,31}(Z^o - Z_{01})}{r_{1,13}(X^o - X_{01}) + r_{1,23}(Y^o - Y_{01}) + r_{1,33}(Z^o - Z_{01})}$$

$$y_1 = -c\frac{Z_{y1}}{N_1} = -c\frac{r_{1,12}(X^o - X_{01}) + r_{1,22}(Y^o - Y_{01}) + r_{1,32}(Z^o - Z_{01})}{r_{1,13}(X^o - X_{01}) + r_{1,23}(Y^o - Y_{01}) + r_{1,33}(Z^o - Z_{01})} \quad \text{1.resim} \qquad (4.36)$$

$$x_2 = -c\frac{Z_{x2}}{N_2} = -c\frac{r_{2,11}(X^o - X_{02}) + r_{2,21}(Y^o - Y_{02}) + r_{2,31}(Z^o - Z_{02})}{r_{2,13}(X^o - X_{02}) + r_{2,23}(Y^o - Y_{02}) + r_{2,33}(Z^o - Z_{02})}$$

$$y_2 = -c\frac{Z_{y2}}{N_2} = -c\frac{r_{2,12}(X^o - X_{02}) + r_{2,22}(Y^o - Y_{02}) + r_{2,32}(Z^o - Z_{02})}{r_{2,13}(X^o - X_{02}) + r_{2,23}(Y^o - Y_{02}) + r_{2,33}(Z^o - Z_{02})} \text{ 2.resim} \qquad (4.37)$$

Bilinmeyen model koordinatlarının (X,Y,Z) ilk yaklaşık değerleri aşağıdaki formüllerden hesaplanır.

$$X^o = X_{01} + (Z^o - Z_{01})k_{x1}$$

$$Y^o = Y_{01} + (Z^o - Z_{01})k_{y1} \qquad \text{1.resimden} \qquad (4.38)$$

$$X^o = X_{02} + (Z^o - Z_{02})k_{x2}$$

$$Y^o = Y_{02} + (Z^o - Z_{02})k_{y2} \qquad \text{2.resimden} \qquad (4.39)$$

$$k_{x1} = \frac{r_{1,11}(x_1 - x_0) + r_{1,12}(y_1 - y_0) - r_{1,13}c}{r_{1,31}(x_1 - x_0) + r_{1,32}(y_1 - y_0) - r_{1,33}c}$$

$$k_{y1} = \frac{r_{1,21}(x_1 - x_0) + r_{1,22}(y_1 - y_0) - r_{1,23}c}{r_{1,31}(x_1 - x_0) + r_{1,32}(y_1 - y_0) - r_{1,33}c} \qquad \text{1.resim} \qquad (4.40)$$

$$k_{x2} = \frac{r_{2,11}(x_2 - x_0) + r_{2,12}(y_2 - y_0) - r_{2,13}c}{r_{2,31}(x_2 - x_0) + r_{2,32}(y_2 - y_0) - r_{2,33}c}$$

$$k_{y2} = \frac{r_{2,21}(x_2 - x_0) + r_{2,22}(y_2 - y_0) - r_{2,23}c}{r_{2,31}(x_2 - x_0) + r_{2,32}(y_2 - y_0) - r_{2,33}c} \qquad \text{2.resim} \qquad (4.41)$$

$$Z^0 = \frac{X_{02} - Z_{02}k_{x2} + Z_{01}k_{x1} - X_{01}}{k_{x1} - k_{x2}} \qquad (4.42)$$

Her model noktası için aşağıdaki hata denklemleri kurularak model koordinatları iteratif olarak hesaplanır.

$$v_{x1} = \frac{\partial x_1}{\partial X}dX + \frac{\partial x_1}{\partial Y}dY + \frac{\partial x_1}{\partial Z}dZ - (x_1 - x_1^o)$$

$$v_{y1} = \frac{\partial y_1}{\partial X}dX + \frac{\partial y_1}{\partial Y}dY + \frac{\partial y_1}{\partial Z}dZ - (y_1 - y_1^o) \qquad (4.43)$$

$$v_{x2} = \frac{\partial x_2}{\partial X}dX + \frac{\partial x_2}{\partial Y}dY + \frac{\partial x_2}{\partial Z}dZ - (x_2 - x_2^o)$$

$$v_{y2} = \frac{\partial y_2}{\partial X}dX + \frac{\partial y_2}{\partial Y}dY + \frac{\partial y_2}{\partial Z}dZ - (y_2 - y_2^o) \qquad (4.44)$$

Bu denklemde bilinmeyenlerin türevleri şu şekildedir.

$$\frac{\partial x}{\partial X} = -\frac{c}{N^2}(N.r_{11} - Z_x.r_{13}) \qquad \frac{\partial y}{\partial X} = -\frac{c}{N^2}(N.r_{12} - Z_y.r_{13})$$

$$\frac{\partial x}{\partial Y} = -\frac{c}{N^2}(N.r_{21} - Z_x.r_{23}) \qquad \frac{\partial y}{\partial Y} = -\frac{c}{N^2}(N.r_{22} - Z_y.r_{23}) \qquad (4.45)$$

$$\frac{\partial x}{\partial Z} = -\frac{c}{N^2}(N.r_{31} - Z_x.r_{33}) \qquad \frac{\partial y}{\partial Z} = -\frac{c}{N^2}(N.r_{32} - Z_y.r_{33})$$

$$X = X^o + dX$$

$$Y = Y^o + dY \qquad (4.46)$$

$$Z = Z^o + dZ$$

$$m_o = \pm\sqrt{\frac{\mathbf{V}^T.\mathbf{V}}{4-3}} \tag{4.47}$$

Yukarıdaki eşitliklerde;

x_1, y_1	:P noktasının birinci resim koordinatları
x_2, y_2	:P noktasının ikinci resim koordinatları
X^o, Y^o, Z^o	:P noktasının yaklaşık model koordinatları
X_{01}, Y_{01}, Z_{01}	:Birinci resmin projeksiyon merkezinin model koordinatları
X_{02}, Y_{02}, Z_{02}	:İkinci resmin projeksiyon merkezinin model koordinatları
X,Y,Z	:Noktanın model koordinatları
R	:3x3 boyutlu dönme matrisidir (3.8).

5. UYGULAMALAR

Tarayıcı üzerine takılan kameradan alınan fotoğraflar ve KKP ile nokta bulutlarının birleştirilmesine ilişkin örnek uygulamalar yapılmıştır. Test alanı iki farklı durak noktasından bindirmeli olarak taranmış ve lazer nokta bulutları ilk uygulamada fotoğrafların karşılıklı yöneltmesi ile ikinci uygulamada ise tek resim yöntemiyle birleştirilmiştir. Bu iki yöntemle elde edilen birleştirme doğrulukları hem kendi arasında hem de diğer yöntemlerle karşılaştırılmıştır. İlk iki uygulamada nokta bulutları test alanındaki kontrol noktaları kullanılarak birleştirilmiştir. Üçüncü uygulama cisim üzerinde ve kontrol noktaları kullanmadan yapılmıştır. Dördüncü uygulamada lazer tarayıcı ve kameradan oluşan sensör birleşimi ile Kampus Cami lazer tarayıcı ile taranmış ve nokta bulutları arasındaki dönüşüm parametreleri tüm alan için ışın demetleri dengelemesi ile hesaplanmıştır. Uygulamalardan elde edilen sonuçlar aynı zamanda kamera konum parametrelerinin hassasiyetini de ortaya koymaktadır. Son uygulama yine kamera görüntüsü ve KKP'nin kullanılmasına yönelik olup lazer tarama noktaları tarayıcıya takılan Nikon D80 kamera görüntüsü ile renklendirilmiştir.

5.1. Uygulama-1: İki Lazer Tarama Durak Noktasındaki Fotoğraflar Yardımıyla Nokta Bulutlarının Birleştirilmesi

Bu uygulamada test alanı iki durak noktasından bindirmeli olarak 3mm nokta sıklığı ile taranmış ve aynı zamanda tarayıcı üzerindeki kamera ile fotoğrafları çekilmiştir (Şekil 5.1). 36 eşlenik kontrol noktası ile fotoğrafların karşılıklı yöneltmesi yapılmış ve model ölçeği eşlenik noktaların lazer tarayıcı koordinatları ile hesaplanmıştır. Birinci durak noktasından yapılan tarama referans kabul edilerek ikinci durak noktasından yapılan taramanın koordinatları (4.5) bağıntısı ile birinci taramanın koordinat sistemine dönüştürüldü. Dönüşüm hassasiyetini belirlemek için 177 kontrol noktasında X,Y,Z koordinat farkları hesaplandı (Şekil 5.2). Kontrol noktalarında hesaplanan ortalama koordinat farkları ve karesel ortalama hataları Tablo 5.1 de verilmiştir. Sonuçlar İEYN ve 3B Benzerlik Dönüşümü ile yapılan birleştirmelerden elde edilen sonuçlarla da karşılaştırıldığında fotoğraflar yardımıyla yapılan birleştirmenin doğruluğunun daha iyi olduğu görülmektedir. Ayrıca dönüşümden sonra kontrol noktalarında oluşan koordinat farklarının lazer tarayıcı ölçülerinden beklenen

100 metrede 8 milimetre nokta konum doğruluğu (Optech, 2010) ile de uyumlu olduğu görülmektedir.

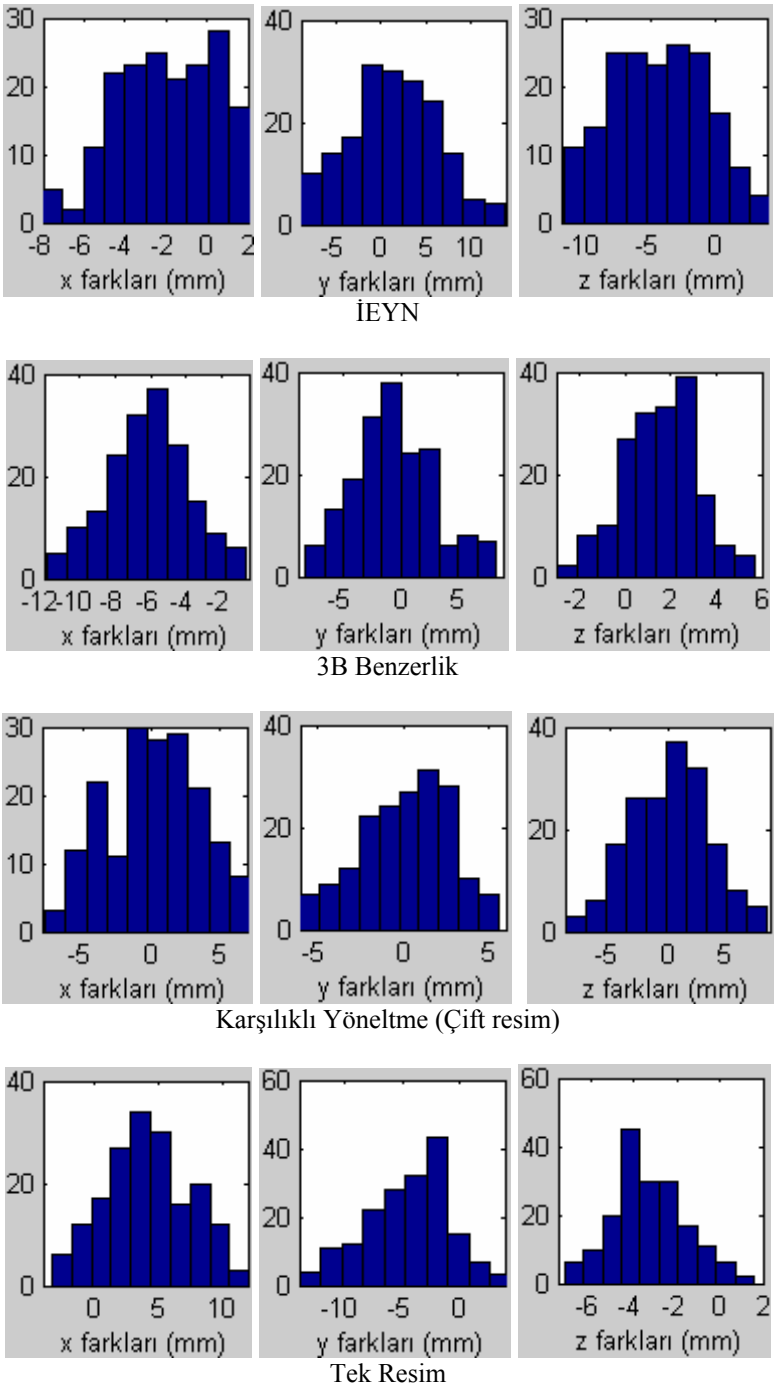


Şekil 5.1. Lazer tarayıcı ve kamera birleşimi ile iki farklı durak noktasından ölçülen nokta bulutları (S1, S2) ve kameradan alınan fotoğraflar (C1, C2)

5.2. Uygulama-2: Tek Lazer Tarama Durak Noktasındaki Fotoğraf Yardımıyla Nokta Bulutlarının Birleştirilmesi

Bu uygulamada birinci durak noktasından yapılan tarama sabit kalarak ikinci durak noktasından yapılan tarama (S2) birinci taramanın (S1) koordinat sistemine dönüştürülerek birleştirildi. İkinci durak noktasındaki kameranın birinci taramanın koordinat sistemindeki konumu 36 kontrol noktası ile m_o=0.16 piksel karesel ortalama hata ile hesaplandı. Daha sonra (4.8) eşitliği ile ikinci durak noktasından yapılan tarama birinci taramanın koordinat istemine dönüştürülerek birleştirildi. Dönüşümün hassasiyetini değerlendirmek için 177 kontrol noktasında koordinat farkları hesaplandı (Şekil 5.2). Ortalama koordinat farkları ve karesel hataları Tablo 5.1 de verilmiştir. Ortalama fakların lazer tarayıcı ölçülerinden beklenen hassasiyetle uyumlu (100m de 8 milimetre nokta konum hatası) olduğu görülmektedir. Hataların büyüklükleri istatistiksel olarak da test edilerek oluşan farkların önemli büyüklükler olmadığı görülmüştür. Sonuçlar İEYN ve 3B Benzerlik dönüşümü yöntemleriyle

karşılaştırıldığında nokta bulutlarının tek resim yöntemi ile daha hassas olarak birleştirildiği görülmektedir (Tablo 5.1).



Şekil 5.2. Nokta bulutlarının İEYN, 3B Benzerlik dönüşümü, Karşılıklı Yöneltme ve Tek Resim yöntemleri ile birleştirilmesi durumunda kontrol noktalarında oluşan koordinat farkları

Tablo 5.1. Nokta bulutlarının farklı tekniklerle birleştirilmesi durumunda kontrol noktalarında oluşan ortalama koordinat farkları ve karesel ortalama hataları

Yöntem	Ortalama farklar (mm)			Farkların standart sapmaları (mm)		
	d_x	d_y	d_z	m_x	m_y	m_z
İteratif En Yakın Nokta	-1.98	1.38	-4.38	2.39	4.83	3.70
3B Benzerlik	-6.17	-0.53	1.57	2.28	3.55	1.63
Tek Resim	4.24	-4.41	-3.28	3.32	3.69	1.66
Karşılıklı Yöneltme	0.16	0.14	0.21	3.39	2.59	3.42

5.3. Ara Sonuç

İEYN yönteminde ilk olarak nokta bulutundan seçilen eşlenik noktalarla yaklaşık dönüşüm parametreleri hesaplanmaktadır. Daha sonra en yakın nokta çiftleri bulunarak dönüşüm parametreleri iteratif olarak hesaplanmaktadır. Bu yöntemde eğer tarama alanında belirgin geometrik özellikler yoksa nokta bulutundan eşlenik nokta seçimi oldukça zor olmaktadır. İteratif yöntem kolay uygulanabilen bir yöntem olmasına rağmen dönüşüm parametrelerinin ilk yaklaşık değerlerinin hesaplanması için eşlenik nokta seçimi bazen yöntemin uygulanmasını güçleştirmektedir. Nokta bulutlarının birleştirilmesinde kullanılan diğer yöntem 3B benzerlik dönüşümü ise lazer tarama işleminden önce obje üzerinde kontrol noktalarının işaretlenmesini gerektirir. Bu işlem ölçme süresini ve maliyetini artırmaktadır.

Fotoğraflar yardımıyla birleştirmede eşlenik noktalar fotoğraflar üzerinden seçilmiş ve nokta bulutları nokta sıklığından bağımsız olarak birleştirilmiştir. Fotoğraflar çok iyi doku bilgisi içerdiğinden obje geometrisine bağlı kalmadan eşlenik noktalar kolaylıkla seçilebilmektedir. Birinci uygulamada kameranın tarayıcıya göre konumu bilindiğinden nokta bulutlarının dönüşümü fotoğrafların karşılıklı yöneltmesi ile yapılmıştır. Lazer tarama işlemi bindirmeli olarak yapıldığından tarama esnasında fotoğraflarda bindirmeli olarak çekilmektedir. Karşılıklı yöneltme için eşlenik nokta seçimi otomatik yada manuel olarak yapılabilir. Tek resim yönteminde obje üzerinde tesis edilen kontrol noktalarından yararlanılmaktadır. Bu yöntemde kontrol noktalarının resim ve tarayıcı koordinatlarının hassas bir şekilde belirlenmesi ve dağılımı sonuç hassasiyeti için çok önemlidir.

Elde edilen sonuçlar (Tablo 5.1) karşılaştırıldığında fotoğraflar yardımıyla yapılan dönüşümlerin İEYN ve 3B benzerlik dönüşümlerinden daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Diğer taraftan karşılıklı yöneltme ile yapılan birleştirmenin doğruluğu tek resim yöntemine göre daha iyidir. Bu yöntemde bindirmeli çekilen fotoğrafların karşılıklı yöneltmesi yeterli sayıda eşlenik nokta ile yapılabilmektedir. Eşlenik nokta seçimi görüntü işleme teknikleriyle de yapılabilir.

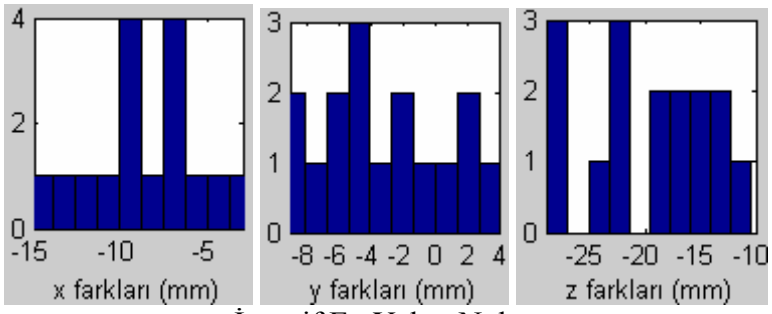
5.4. Uygulama-3: Karşılıklı Yöneltme Parametreleriyle Birleştirmenin Cisim Üzerinde Uygulanması

Bu uygulamada seçilen bir yüzey bindirmeli olarak iki farklı durak noktasından 3mm nokta sıklığı ile tarandı ve tarayıcı üzerindeki Nikon D80 digital kamera ile fotoğrafı çekildi (Şekil 5.3). Lazer taramaları fotoğrafların karşılıklı yöneltmesi ile birleştirildi. Karşılıklı yöneltme bindirmeli fotoğraflar üzerinde işaretlenen 46 adet eşlenik nokta ile yapıldı. Model ölçeği yani b_x,b_y,b_z nin obje uzayındaki karşılıkları seçilen noktaların lazer tarayıcı koordinatları ile hesaplandı. Birinci durak noktasından yapılan lazer taraması sabit kalarak ikinci durak noktasından yapılan tarama (4.5) formülü ile birinci taramanın koordinat sistemine dönüştürülerek birleştirildi. Yöntemin hassasiyetini belirlemek için ölçme alanında işaretlenen 16 kontrol noktasının birinci (sabit) nokta bulutu koordinatları ile ikinci nokta bulutunun dönüşümden sonraki koordinatları arasındaki farklar hesaplandı (Şekil 5.4). Kontrol noktalarının lazer tarayıcı koordinatları noktaların özel işaretleri sayesinde her iki nokta bulutundan otomatik olarak elde edilmiştir.

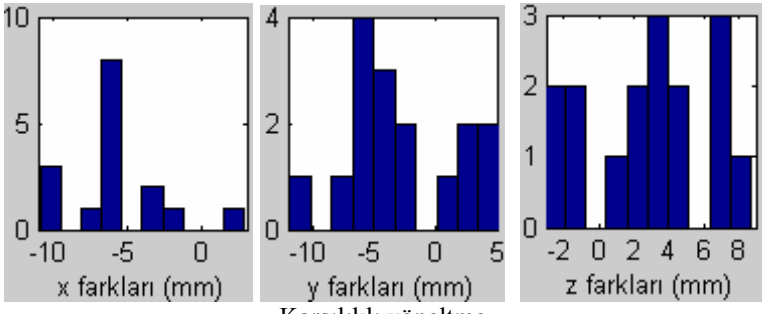
Taramalar İEYN yöntemi ile de birleştirildi ve kontrol noktalarındaki farklar hesaplandı. Sonuçlar karşılaştırıldığında karşılıklı yöneltme ile yapılan birleştirme doğruluğunun İEYN yönteminden daha iyi olduğu görülmektedir (Tablo 5.2).



Şekil 5.3. Lazer tarayıcı ve kamera birleşimi ile aynı alan için iki farklı durak noktalarından bindirmeli yapılan lazer taraması (S1, S2) ve kamera görüntüsü (C1, C2)



İteratif En Yakın Nokta



Karşılıklı yöneltme

Şekil 5.4. Nokta bulutlarının İEYN ve hedef işaretleri kullanmadan Karşılıklı Yöneltme ile birleştirilmesi durumunda kontrol noktalarında oluşan koordinat farkları

Tablo 5.2. Cisim üzerinde yapılan taramanın İEYN ve Karşılıklı Yöneltme yöntemleri ile birleştirilmesi durumunda kontrol noktalarındaki ortalama koordinat farkları ve karesel ortalama hataları

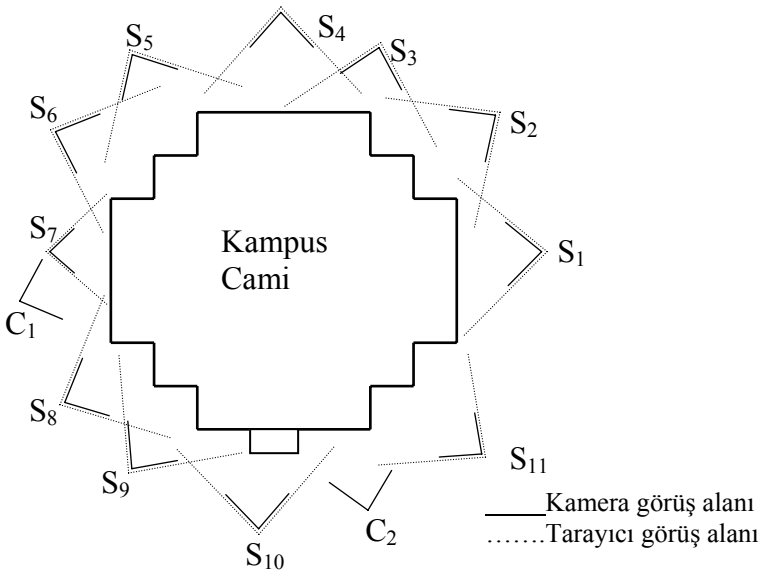
Yöntem	Ortalama Farklar (mm)			Farkların standart sapmaları (mm)		
	d_x	d_y	d_z	m_x	m_y	m_z
İteratif En Yakın Nokta	-16.37	-6.12	-14.19	3.25	4.05	5.70
Karşılıklı Yöneltme	-3.68	-1.79	1.86	3.08	3.83	2.96

5.5. Uygulama-4: Kampus Cami Lazer Taraması

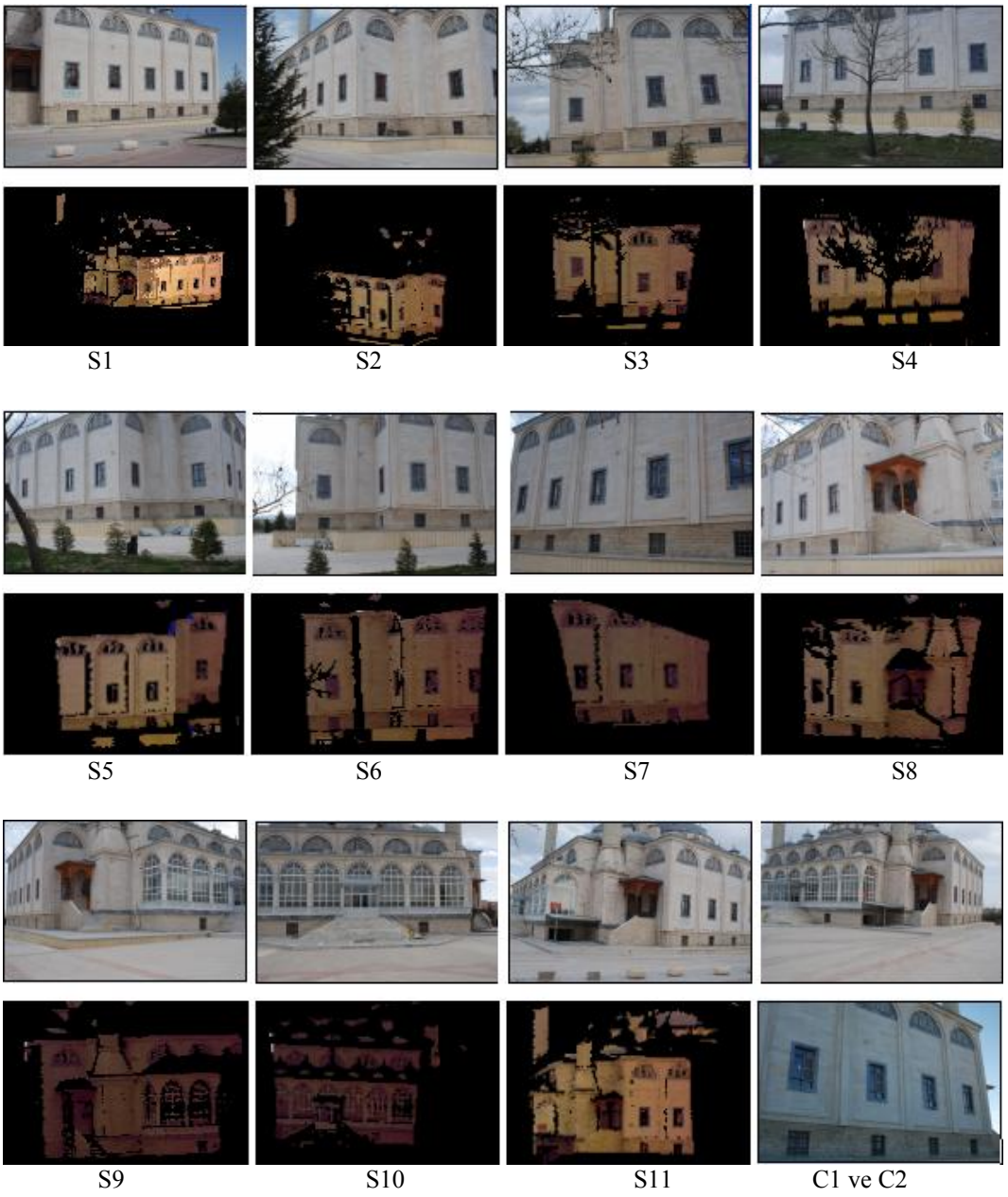
Kampüs camisi lazer tarayıcı ve kamera birleşimi ile ölçülerek modellendi. Lazer tarayıcı ile 11 durak noktasından (S1,S2….S11) ölçü yapıldı ve her durak noktasında tarayıcı üzerindeki kamera ile tarama alanının fotoğrafı çekildi. Taramaların yeterince bindirmeli yapılamadığı alanlarda tarayıcı üzerindeki kamera sökülerek serbest elle tarama alanının fotoğrafı çekildi (C1 ve C2) (Şekil 5.6). Taramalar 4 cm nokta sıklığı ile yapıldı. Kampus cami modellemesinde lazer tarayıcı ve kamera durak noktaları Şekil 5.5 de görülmektedir.

Işın demetleri dengelemesi için gerekli yaklaşık kamera çekim merkezi koordinatları ve dönme açıları referans olarak seçilen birinci nokta bulutundan başlayarak sırasıyla hesaplandı. Fotoğrafların örtülü alanlarında ortalama 20 bağlama noktası işaretlendi (Şekil 5.7a ve Şekil 5.7b). Bir durak noktasından alınan fotoğraf birden fazla fotoğrafla örtülü alan oluşturuyorsa bu alanlarda da bağlama noktaları işaretlendi. Lazer tarama durak noktalarından alınan fotoğraflar (S1,S2….S11), ilave fotoğraflarda (C1,C2) dahil edilerek ışın demetleri dengelemesi ile değerlendirildi. Işın demetleri dengelemesinden sonra referans nokta bulutuna göre kamera çekim merkezi koordinatları ve dönüklükleri elde edildi. Birinci durak noktasından yapılan tarama referans kabul edildiği için her durak noktasından yapılan tarama (4.8) eşitliği ile birinci taramanın koordinat sistemine dönüştürülerek birleştirildi (Şekil 5.9, Şekil 5.10). Hesap kontrolü için obje üzerinde seçilen 10 adet kontrol noktasının dönüşümden sonraki koordinatları fotogrametrik olarak ölçülen koordinatlarla karşılaştırıldı. Bu sistemde fotogrametrik koordinatlar hesap kontrolü için sabit bir sistem tanımlamaktadır (El-Hakim ve ark., 1996; Al-Manasir ve Fraser, 2006a). Ayrıca nokta bulutları İEYN yöntemi ile de birleştirildi ve sonuçları karşılaştırıldı. Her iki yöntemde dönüşümden

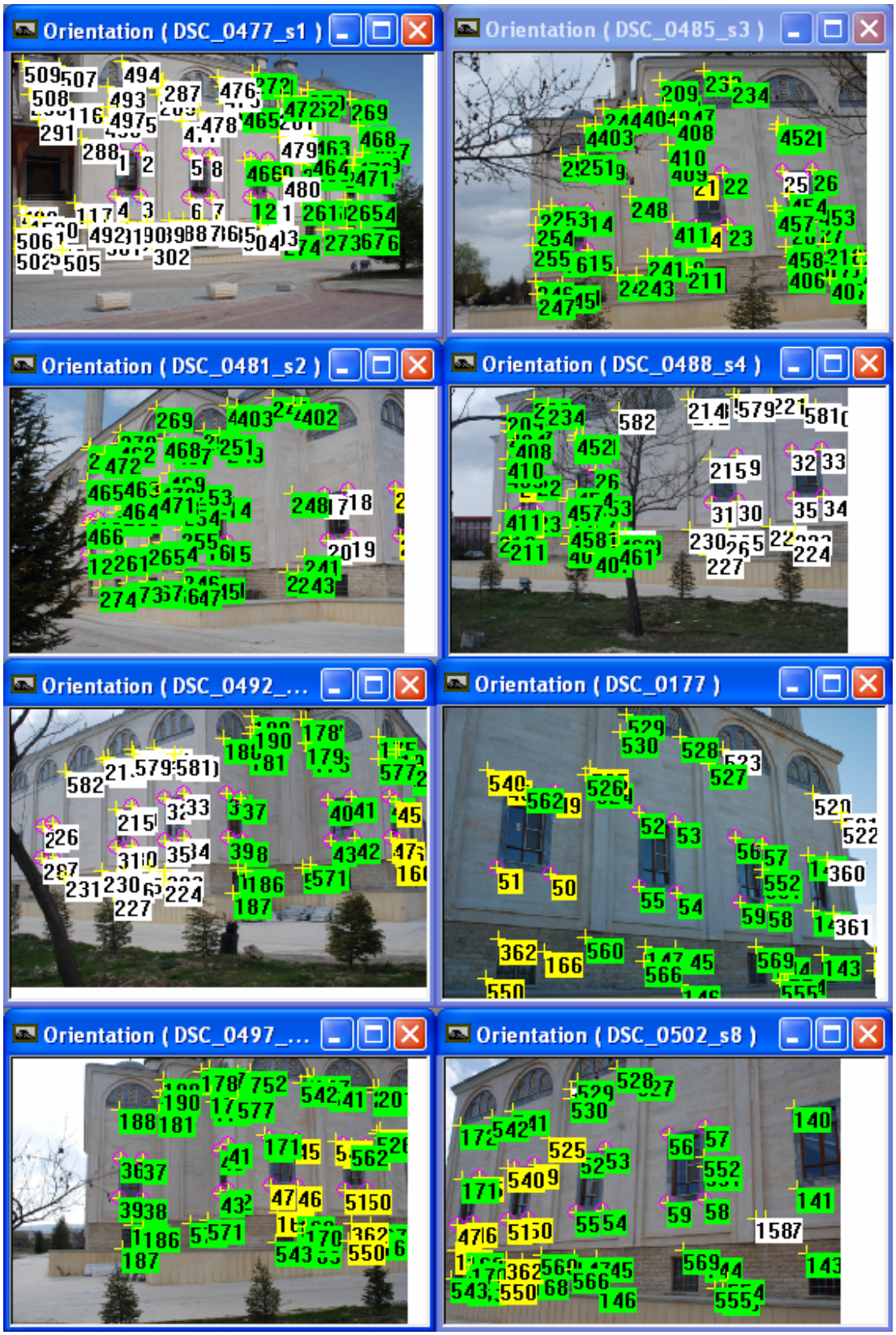
sonra kontrol noktalarında hesaplanan koordinat farkları Şekil 5.8 de, ortalama koordinat farkları ve standart sapmaları da Tablo 5.3 de verilmiştir.



Şekil 5.5. Kampüs camii lazer taraması için lazer tarayıcı ve kamera durak noktaları. S1, S2,….S11 lazer tarayıcı ve kamera kombinasyonu ile ölçü yapılan durak noktaları, C1 ve C2 ise kamera tarayıcıdan sökülerek yalnızca fotoğraf çekilen durak noktalarıdır.



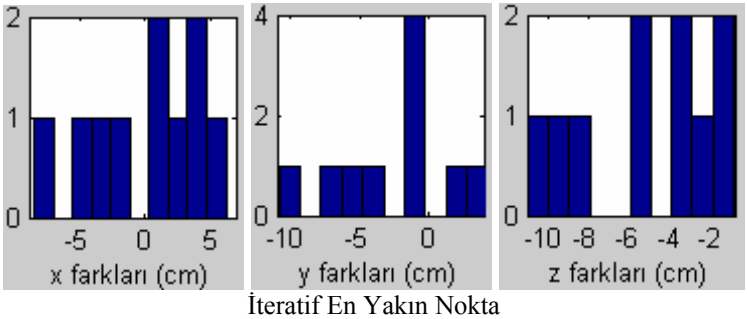
Şekil 5.6. Kampüs cami lazer taramasında Nikon D80 kamera ile lazer tarama durak noktalarından ve serbest elle alınan fotoğraflar



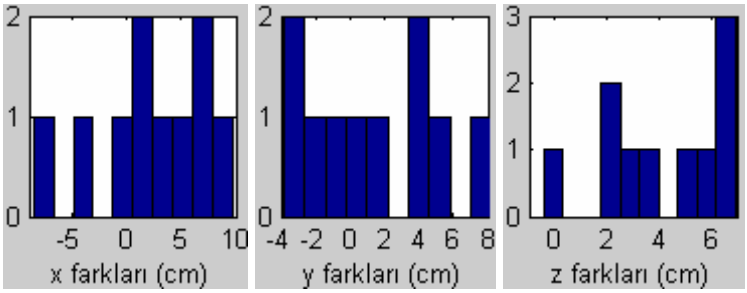
Şekil 5.7a. Işın demetleri dengelemesinde stereoskopik resimlerin bağlama noktaları ile bağlanması



Şekil 5.7b. Işın demetleri dengelemesinde stereoskopik resimlerin bağlama noktaları ile bağlanması



İteratif En Yakın Nokta



Karşılıklı Yöneltme (Işın demetleri)

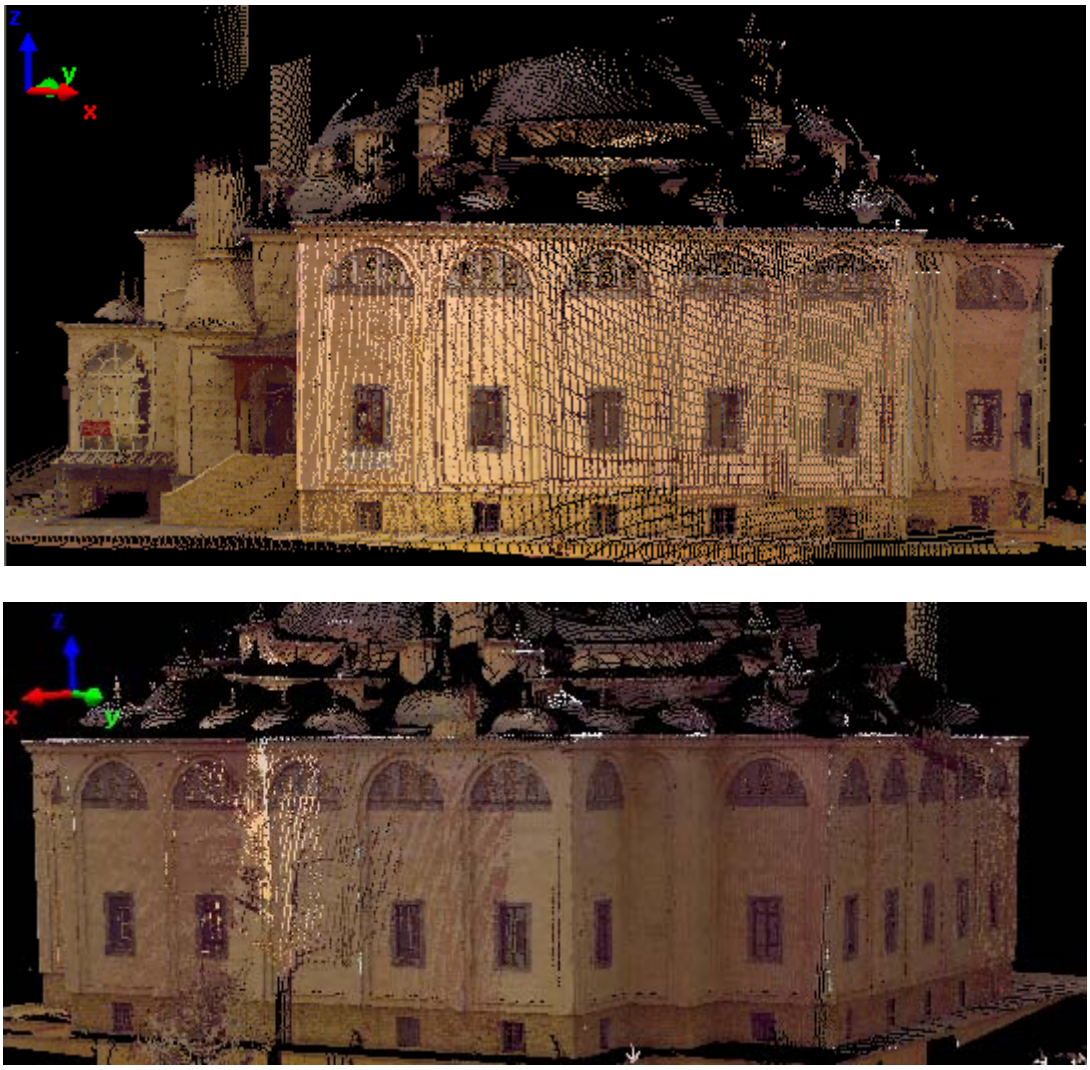
Şekil 5.8. Kampüs cami modellemesinde nokta bulutları İEYN ve Karşılıklı Yöneltme (Işın Demetleri) ile birleştirildiğinde kontrol noktalarında oluşan koordinat farkları

Tablo 5.3. Kampüs cami modellemesinde nokta bulutları İEYN ve Karşılıklı Yöneltme (ışın demetleri) ile birleştirildiğinde kontrol noktalarında oluşan ortalama koordinat farkları ve karesel ortalama hataları

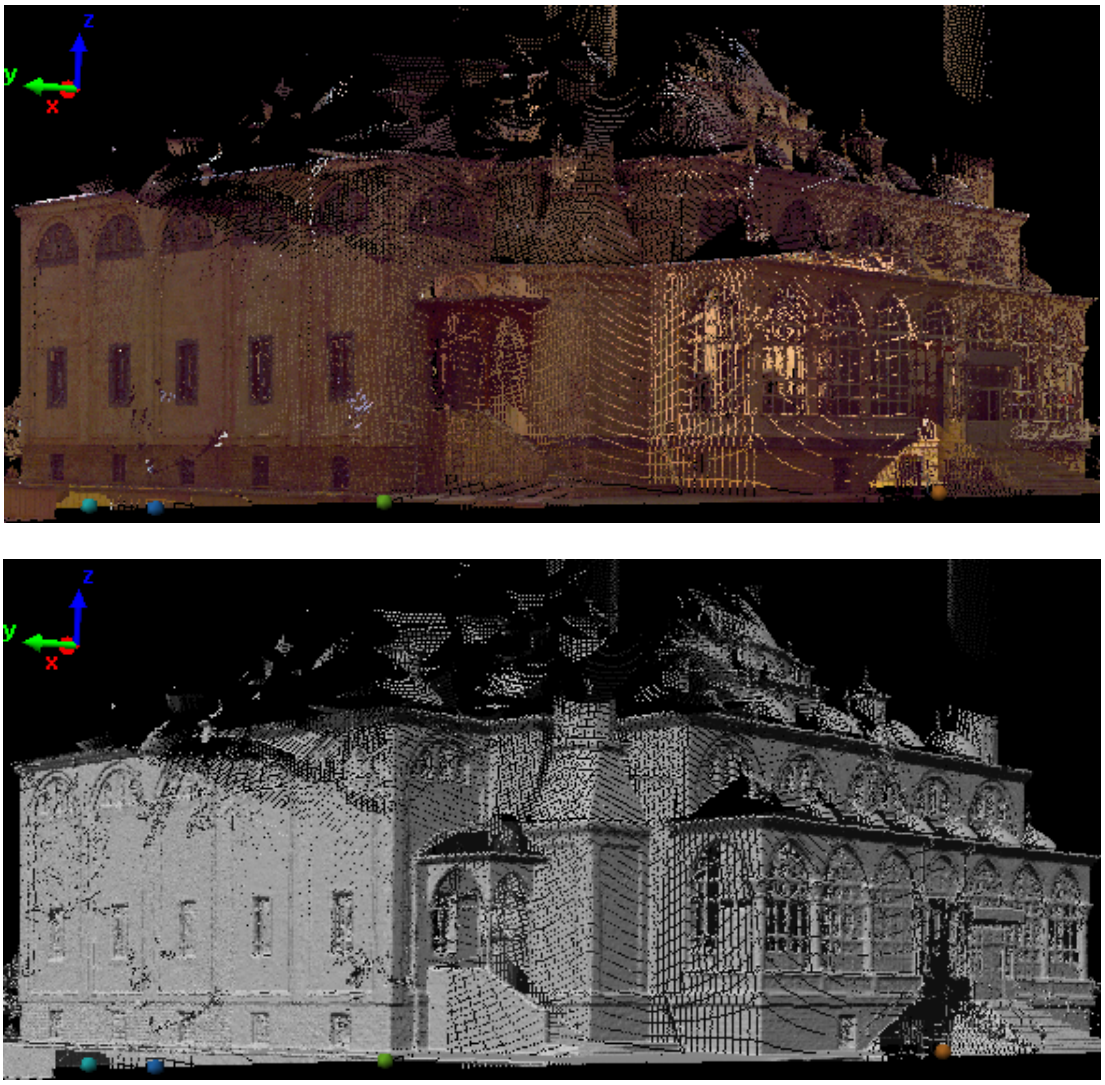
Yöntem	Ortalama Farklar (cm)			Farkların standart sapmaları (cm)		
	d_x	d_y	d_z	m_x	m_y	m_z
İteratif En Yakın Nokta	0.18	-2.41	-5.18	4.62	4.48	3.42
Karşılıklı Yöneltme (Işın Demetleri)	2.37	1.37	4.07	5.53	4.04	2.48

Tablodan görülebileceği gibi kontrol noktalarındaki farklar fotoğraflarla yapılan birleştirme doğruluğunun İEYN yönteminden daha iyi olduğunu göstermektedir. Bu yöntemde nokta bulutları arasında ortak taranmış alan az olsa dahi ilave fotoğrafların ışın demetlerine dahil edilmesi ile nokta bulutları birleştirilebilmektedir. Şekil 5.5 de görüldüğü gibi 7 ile 8 ve 10 ile 11 numaralı durak noktalarından yapılan taramalar arasındaki bindirme oranı oldukça zayıftır. Bu taramaların İEYN yöntemi ile birleştirilmesi oldukça zordur. Oysa ek fotoğraflar yardımıyla ölçüler kolaylıkla birleştirilebilmiştir. Işın demetleri dengelemesi, özellikle bindirme oranı zayıf olan nokta bulutlarının birleştirilmesinde avantaj sağlamaktadır. Işın demetleri dengelemesine katılan her fotoğraf modeli güçlendirmektedir. Ayrıca obje yüzeyinde

detayların benzerliği ve simetrik yapısı İEYN yöntemiyle birleştirmeyi güçleştirmektedir. Örneğin 7 numaralı durak noktasından yapılan tarama komşu nokta bulutları ile aynı geometrik detayları içerdiğinden birleştirilememiş bu nedenle bu noktadan yapılan tarama farklı detaylar içerecek şekilde tekrar yapılmıştır. Gerek İEYN, gerekse karşılıklı yöneltmede art arda yapılan birleştirme sayısı arttıkça doğruluk azalmaktadır. Çünkü ardışık birleştirmelerden oluşan hatalar tüm modeliçin kontrol altına alınmamaktadır. Bu nedenle bütün yöntemler için çok sayıda nokta bulutunun ardışık olarak birleştirilmesinden kaçınılmalıdır.

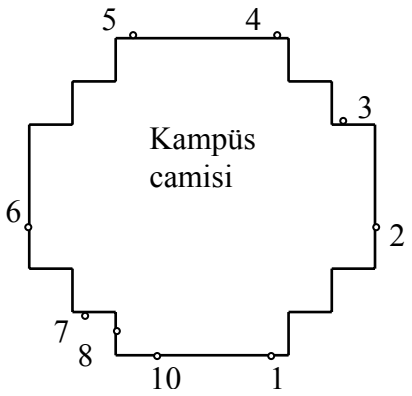


Şekil 5.9. Kampus camisinin YLT ve kamera birleşimi ile ölçülen ve ışın demetleri dengelemesi ile birleştirilen nokta bulutu görüntüleri



Şekil 5.10. Kampus camisinin lazer tarayıcı nokta bulutlarından oluşan 3B modelinin renkli ve siyah beyaz görüntüleri

Lazer tarayıcı nokta bulutlarının birşleştirilmesinden sonra elde edilen 3B modelin doğruluğunu kontrol için cisim üzerinde bazı detay noktaları arasındaki uzunluklar kontrol edildi (Şekil 5.11). Detay noktalarının poligon noktalarından hareketle koordinatları ölçüldü ve uzunlukları hesaplandı. Bu uzunluklar lazer tarayıcı nokta bulutundan ölçülen cephe uzunlukları ile karşılaştırıldı (Tablo 5.4). Ölçülen uzunluklar arasında en büyük fark 5cm dir. Lazer tarayıcı nokta sıklığının 4cm olduğu düşünülürse bu farkın ölçü sınırları içinde olduğu görülmektedir.



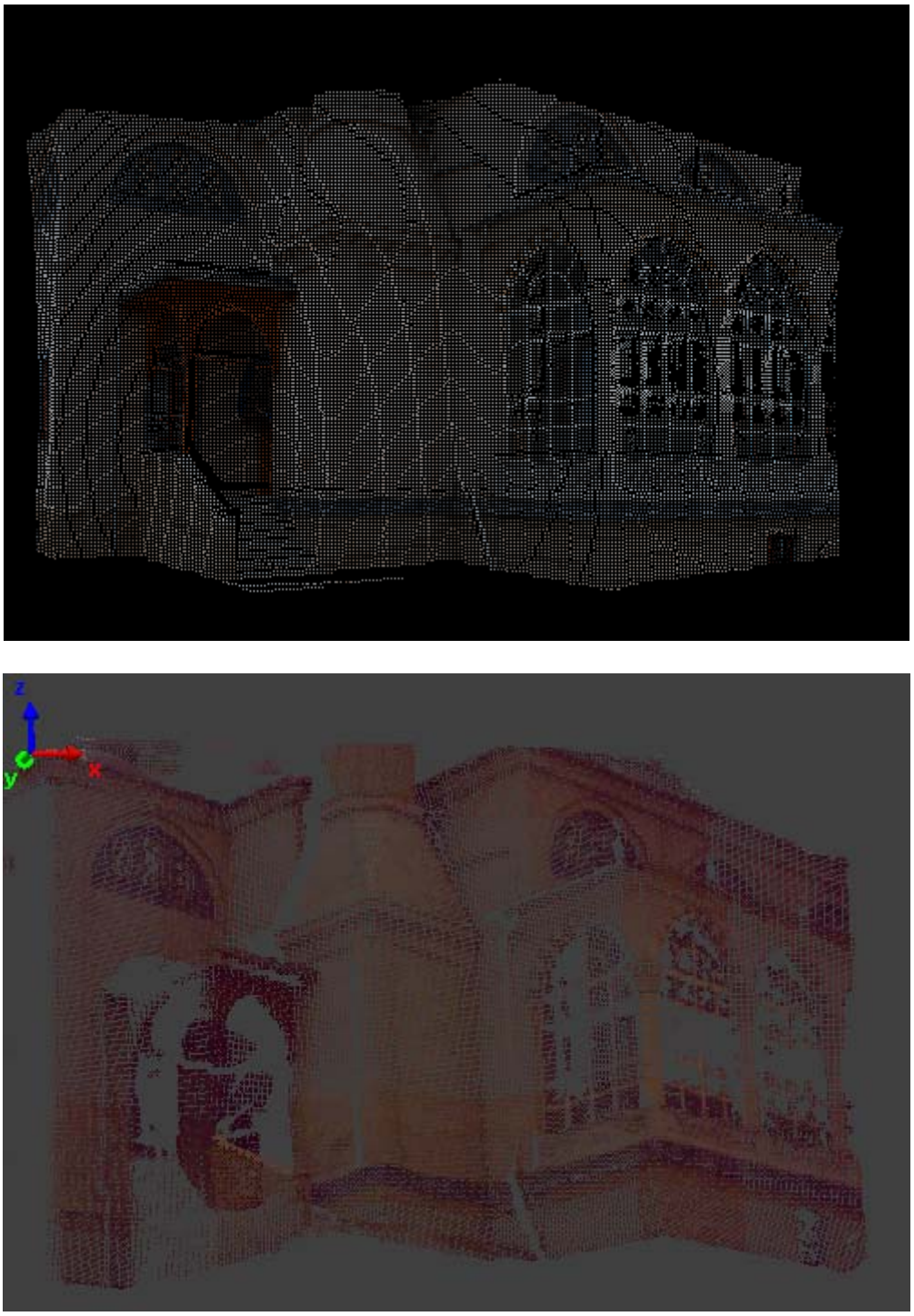
Şekil 5.11. Kampus camisi üzerinde cephe kontrolu için klasik yöntemle (totalstation) koordinatları ölçülen detay noktaları.

Tablo 5.4. Kampus camisi 3B nokta bulutu modelinden seçilen detay noktaları arasında klasik yöntemle (totalstation) ve nokta bulutundan ölçülen uzunluklar

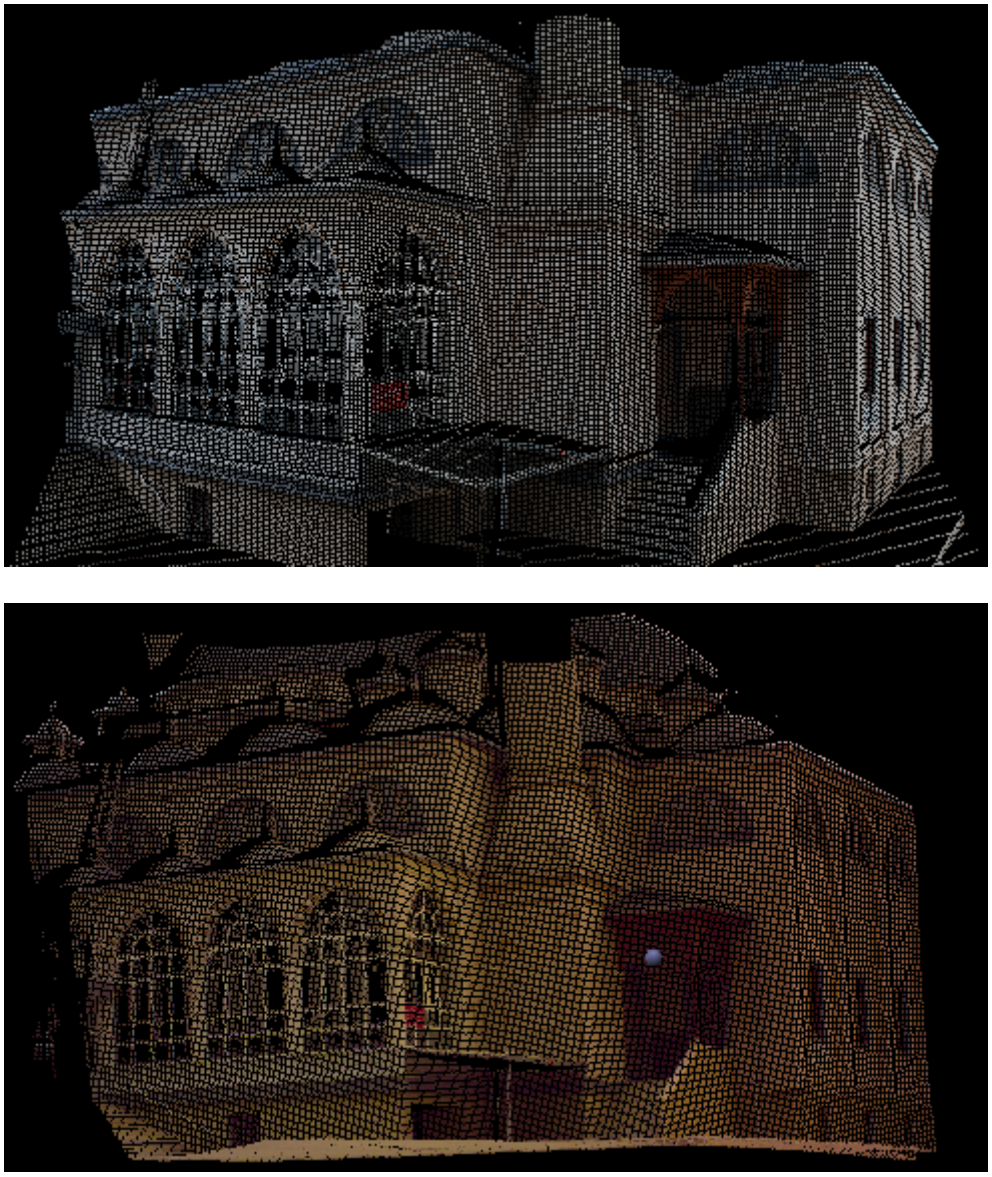
Cephe noktaları	Klasik yöntemle ölçülen uzunluklar (m)	Nokta bulutundan ölçülen uzunluklar (m)	Fark (m)
1-5	46.35	46.34	0.01
5-9	41.72	41.76	-0.04
3-7	44.77	44.80	-0.03
2-6	41.90	41.85	0.05
4-8	43.98	43.93	0.05

5.6. Uygulama-5: Nokta Bulutlarının Renklendirilmesi

Bu uygulamada lazer tarayıcı noktalarına tarayıcıya takılan Nikon D80 kamera görüntüsünden renk değeri atanarak noktalar renklendirilmiştir. Kampus cami için yapılan lazer taramaları tarayıcı üzerindeki kamera ile alınan fotoğraflarla renklendirilmiştir. KKP kullanılarak doğrusallık eşitlikleri (3.7) ile tarama noktasının resim koordinatları hesaplanmış ve bu pikselin rengi tarama noktasının rengi olarak kaydedilmiştir. Noktanın resim üzerindeki yeri için distorsiyon düzeltmesi de ters işaretli olarak koordinatlara eklenmiştir. Sonuçta daha iyi renklendirilmiş nokta bulutu görüntüsü elde edilmiştir (Şekil 5.12a, Şekil 5.12b).



Şekil 5.12a. 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



Şekil 5.12b. 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

6. ARAŞTIRMA SONUÇLARININ YORUMLANMASI

Kamera kalibrasyonu, KKP'nin hesabını doğrudan etkiler. Bu nedenle kamera kalibrasyonunun yeterli doğrulukta yapılması gerekir. Özellikle odak uzaklığı ve asal nokta koordinatları KKP'nin hesaplanmasında çok etkilidir.

Tarayıcı aletin ve kameranın görüş açısı birbirleri ile uyumlu olmalıdır. Yani durulan noktadan lazer tarayıcı ve kamera ile aynı büyüklükte alanlar görüntülenebilmelidir. Eğer kameranın görüş alanı tarayıcıdan çok büyük olursa KKP için yapılan ölçüde test alanı resim üzerinde küçük bir alan kaplayacağı için KKP doğru olarak hesaplanamayacaktır. Test alanında işaretlenen kontrol noktaları tarayıcının kurulacağı noktadan seçilebilecek büyüklükte olmalıdır. Hem fotoğraftan hem de nokta bulutundan kolaylıkla seçilebilecek bir nokta şeklinin belirlenmesi gerekir.

KKP'nin hesabında noktaların resim ve tarayıcı koordinatlarının hassasiyeti çok önemlidir. Resim düzlemi ve test yüzeyi arasındaki ölçek farkı çok büyük olduğu için koordinatlardaki küçük bir fark sonucu çok fazla etkilemektedir. Bu nedenle kontrol noktalarının resim ve lazer tarayıcı koordinatlarının iyi hesaplanması yani hedef işaretlerinin tam ortasından okunması gerekir. 270 kontrol noktası ile yapılan hesaplamada KKP 0.53 piksel hassasiyetle hesaplanmıştır. Bu hesaplamada noktalar için bulunan en büyük düzeltme 1 piksel civarındadır. Daha iyi bir hesaplama için ölçülerden düzeltme değeri 0.50 pikselden büyük olanları dışarıda bırakarak geriye kalan 124 kontrol noktası ile KKP 0.27 piksel karesel ortalama hata ile hesaplanmıştır. Burada önemli olan hesaplamada kullanılan noktaların test yüzeyine homojen dağılmasıdır. Eğer noktalar belirli bir bölgede toplanırsa doğru bir hesaplama yapılamaz.

Distorsiyon hatası resim koordinatlarını ve dolayısıyla KKP'nin hesabını etkileyen bir hatadır. Bu nedenle distorsiyon hatasının bu hesaplamada mutlaka hesaba katılması gerekir. KKP'nin karesel ortalama hataları parametrelerin oldukça iyi bir hassasiyetle hesaplandığını göstermektedir. KKP koordinatlar için maksimum 0.8 milimetre, dönüklük açıları için maksimum 1.5 grad saniyesi hassasiyetle hesaplanmıştır (Tablo 3.1). Bu hatanın etkisi 100m mesafede maksimum 0.24mm dir. Bu da lazer tarayıcının ölçme mesafesi ve nokta konum doğruluğu (8mm@100m) dikkate alındığında oldukça iyi bir sonuçtur.

Uygulamalar bölümünde birinci ve ikinci uygulamada aynı ölçüler farklı tekniklerle birleştirilmiş ve sonuçları İEYN ve 3B Benzerlik Dönüşümü yöntemleri ile

karşılaştırılmıştır. Bu uygulamalarda birleştirmeler hedef işaretleri yardımıyla yapılmıştır. Sonuçlar karşılaştırıldığında karşılıklı yöneltme ile elde edilen d_x=0.16mm, d_y=0.14mm, d_z=0.21mm ortalama koordinat farkları diğer yöntemlerle elde edilen ortalama koordinat farklarından daha küçüktür. Karşılıklı yöneltme (çift resim değerlendirmesi) ile elde edilen sonuç tek resim değerlendirmesinden daha iyidir (Tablo 5.1). Tek resim yöntemi ile birleştirmede kamera konumunun hesaplanma hassasiyeti sonucu doğrudan etkilemektedir. Her iki uygulamada kontrol noktalarındaki koordinat farkları istatistiksel olarak da test edilmiş ve farkların normal dağılımda olduğu görülmüştür. Farkların normal dağılımda olması KKP'nin doğru olduğunu da göstermektedir. Eğer tarama alanında kontrol noktaları işaretlenmemiş ise bu durumda, tek resim yöteminde kameranın sabit nokta bulutuna göre konumu fotoğraftan ve nokta bulutundan seçilecek yeterli sayıda detay noktaları ile hesaplanabilir.

Üçüncü uygulamada laboratuarda test alanı dışında başka bir alan bindirmeli olarak taranmış ve fotoğrafların karşılıklı yöneltmesi ile nokta bulutları birleştirilmiştir. Karşılıklı yöneltme manuel olarak seçilen 45 adet eşlenik nokta ile yapılmıştır. Dönüşümün hassasiyetini belirlemek için kontrol noktalarının birinci durak noktasından yapılan tarama koordinatları ile ikinci durak noktasından yapılan taramanın dönüşümden sonraki koordinatları karşılaştırılmıştır. Ortalama koordinat farklarının lazer tarayıcı ölçülerinden beklenen doğruluk değerinden daha küçük olduğu görülmektedir (Tablo 5.2). Sonuçlar İEYN yöntemi ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında da karşılıklı yöneltme ile yapılan birleştirmenin daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Tablo 5.2 de karşılıklı yöneltme ile elde edilen ortalama koordinat farkları İEYN yöntemine göre oldukça küçük değerlerdir. Karşılıklı yöneltmede eşlenik nokta seçiminin elle yapılması durumunda nokta bulutları yeterli doğrulukla birleştirilebilmiştir. Eşlenik noktaların görüntü eşleme teknikleri ile belirlenmesi durumunda birleştirme doğruluğu daha da artacaktır. Bunun yanında karşılıklı yöneltme için eşlenik noktaların uygun dağılımda olması da önemlidir. Yani karşılıklı yöneltmenin doğruluğu birleştirme doğruluğunu etkileyecektir.

Kampüs cami modellemesi, fotoğraflar yardımıyla nokta bulutlarının birleştirilmesinin uygulanabilirliğini ve avantajlarını göstermesi bakımından iyi bir örnektir. Bu uygulamada tarayıcı üzerindeki kamera sökülerek yeterli oranda bindirmeli taranamayan alanların serbest elle fotoğrafları çekilmiş, bu fotoğraflar ve lazer tarama durak noktalarından alınan tüm fotoğraflar ışın demetleri dengelemesi ile değerlendirilerek dönüşüm parametreleri hesaplanmıştır. İlave fotoğraflar modeli

güçlendirmektedir. Işın demetleri dengelemesi ile yapılan birleştirme sonuçları benzer uygulamalardan bulunan sonuçlarla (Al-Manasir ve Fraser, 2006a) karşılaştırıldığında bu uygulamada tarama sayısı daha fazla olmasına rağmen yaklaşık aynı hassasiyette sonuçlar elde edilmiştir. y ve z koordinatları için hesaplanan ortalama koordinat farkları İEYN yöntemine göre daha küçüktür. Ancak x koordinatı için hesaplanan ortalama koordinat farkı, İEYN yönteminde d_x=0.18cm, karşılıklı yöneltme d_x=2.37 cm olarak hesaplanmıştır. Lazer tarama nokta sıklığı (4cm) ile karşılaştırıldığında bu farkın da küçük bir değer olduğu görülmektedir. Gerek İEYN, gerekse karşılıklı yöneltme ve ışın demetleri yönteminde art arda yapılan birleştirmelerde tarama sayısı arttıkça birleştirme doğruluğu azalacaktır. Çünkü ardışık birleştirmelerden oluşan hatalar tüm model için kontrol altına alınamamaktadır. Bina yüzeyi modellemesi gibi bütün ölçülerin kapalı bir model içerisin değerlendirilebilmesi her zaman mümkün değildir. Bu nedenle bütün yöntemler için art arda çok sayıda nokta bulutunun referans nokta bulutunun koordinat sistemine göre birleştirilmesinden kaçınılmalıdır. Örneğin güzergah taramalarında ortak koordinat siteminde koordinatları ölçülmüş kontrol noktaları ile ardışık birleştirmelerden oluşan hatalar kontrol altına alınmalıdır (Scaioni, 2005).

Sonuç olarak İEYN ve 3B benzerlik dönüşümü yöntemleri ile karşılaştırıldığında fotoğraflar yardımıyla nokta bulutlarının birleştirilmesi oldukça iyi bir doğrulukla yapılmıştır. Ayrıca kampüs cami modellemesinde olduğu gibi cismin geometrik yapısından dolayı yeterince bindirmeli yapılamayan taramalar arasındaki dönüşüm parametreleri ilave resimlerin ışın demetleri dengelemesine katılmasıyla hesaplanabilmektedir.

İEYN yönteminde, ilk iterasyon için nokta bulutları arasındaki yaklaşık dönüşüm parametrelerinin bilinmesi gerekir. Yaklaşık dönüşüm parametreleri nokta bulutundan seçilen eşlenik noktalar yardımıyla hesaplanır. Ancak belirgin geometrik detaylar içermeyen alanlarda nokta bulutundan eşlenik nokta seçimi çok zordur. Buna karşılık içerdiği doku bilgisi ile fotoğraf üzerinden eşlenik nokta seçimi kolaylıkla yapılabilmekte ve nokta bulutları birleştirilebilmektedir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Optech Ilris 3D yersel lazer tarayıcısı üzerine Nikon D80 fotoğraf makinesi monte edilmiş ve resim koordinat sistemi ile lazer tarayıcı koordinat sistemleri arasındaki dönüşüm parametreleri hesaplanmıştır. Yani lazer tarayıcı koordinat sistemine göre resim çekme makinesinin konum parametreleri hesaplanmıştır. Kamera konum parametreleri m_o=0.27piksel (1.65mikron) karesel ortalama hata ile hesaplanmıştır. Parametrelerin doğruluğunu kontrol için üç farklı kontrol yöntemi geliştirilmiş ve her bir kontrolde parametrelerin yeterli hassasiyetle hesaplandığı görülmüştür.

Uygulamalar bölümünde lazer tarayıcı ve kamera birleşimi ile ölçüler yapılmış ve kameradan alınan fotoğraflarla nokta bulutları birleştirilmiştir. Dört farklı uygulamada nokta bulutları fotoğraflar yardımıyla birleştirilmiş ve sonuçları İEYN ve 3B benzerlik yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. İEYN ve 3B Benzerlik Dönüşümü yöntemleri ile yapılan birleştirmelerle karşılaştırıldığında fotoğraflar yardımıyla yapılan birleştirme doğruluğunun daha iyi olduğu görülmüştür. Fotoğraflar yardımıyla yapılan birleştirmelerde ise en iyi sonuç karşılıklı yöneltme (çift resim değerlendirmesi) ile yapılan birleştirmeden elde edilmiştir. Aynı zamanda, fotoğraflarla yapılan birleştirmelerde ortalama koordinat farkları lazer tarayıcılardan beklenen 100m de 8mm nokta konum hatasından da küçüktür.

Kampus cami modellemesinde nokta bulutları İEYN ve ışın demetleri dengelemesi yöntemleri ile birleştirilmiştir. Dönüşümden sonra kontrol noktalarındaki ortalama koordinat farkları karşılaştırıldığında ışın demetleri dengelemesi ile elde edilen ortalama koordinat farklarının İEYN yöntemine göre daha küçük olduğu görülmüştür.

Uygulamalardan elde edilen sonuçlar fotoğraflar yardımıyla nokta bulutlarının yüksek doğrulukla birleştirilebildiğini göstermiştir. Işın demetleri dengelemesine ilave fotoğraflarında dahil edilmesi ile nokta bulutları arasında bindirme oranı az olsa bile dönüşüm parametreleri hesaplanabilmektedir. Nokta bulutlarının birleştirilmesinde İEYN yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır Bu yöntemin başarısız olduğu durumlarda lazer tarayıcı ve kamera birleşimi ile yapılan ölçüler fotoğraflar yardımıyla yükse doğrulukla birleştirilebilir. Özellikle taranan yüzeyin yapısına bağlı olarak nokta bulutundan eşlenik nokta seçiminin zor olduğu durumlarda fotoğraflar yardımıyla birleştirme tekniği uygulanabilir. Aynı zamanda, fotoğraflar yardımıyla yapılan birleştirmede lazer tarama nokta sıklığının birleştirme doğruluğuna etkisi giderilmiş

olmaktadır. Ayrıca, otomatik birleştirme tekniklerinin çoğunda tarayıcıya takılan kamera görüntülerinden yararlanılmaktadır.

Tarayıcı üzerindeki kamera görüntüleri yalnızca nokta bulutlarının birleştirilmesinde değil aynı zamanda nokta bulutu görünümünün iyileştirilmesinde ve nokta bulutuna doku kaplamada da kullanılmaktadır. Lazer tarayıcının dahili kamerası ile renklendirilen nokta bulutundan detaylar tam olarak seçilemeyebilir. Bu durumda tarayıcıya takılan yüksek çözünürlüklü kamera görüntüsü ile nokta bulutları yeniden renklendirilerek nokta bulutu görünümü iyileştirilebilir. Uygulama kısmında tarayıcıya takılan kamera görüntüsü ile lazer tarayıcı noktaları renklendirilerek, lazer tarayıcı noktalarının görünümü iyileştirilmiş ve detaylar daha iyi seçilebilir hale gelmiştir.

Fotogrametrik değerlendirme ve nokta bulutuna doku kaplamada da yüksek çözünürlüklü fotoğraflar kullanılmaktadır. Doku kaplaması için öncelikle nokta bulutunun koordinat sisteminde kamera izdüşüm merkezinin hesaplanması gerekir. İzdüşüm merkezi koordinatları fotoğraftan ve nokta bulutundan seçilebilen kontrol noktaları ile hesaplanır. Lazer tarayıcı ve kamera birleşiminde, kameranın lazer tarayıcı koordinat sistemine göre konumu hassas olarak bilindiğinden kameradan alınan fotoğrafların yöneltmesi için kontrol noktasına gerek yoktur. Kameradan alınan fotoğraf, KKP ile lazer tarayıcı koordinat sistemine dönüştürülerek nokta bulutu üzerine kaplanabilir.

Sonuç olarak, lazer tarayıcılara yüksek çözünürlüklü kamera takılması hem nokta bulutlarının yüksek doğrulukla birleştirilmesini ve hemde renklendirme ve doku kaplama uygulamaları kolaylıkla yapılarak nokta bulutu görünümlerinin iyileştirilmesini sağlamaktadır.

KAYNAKLAR

Akca, D., 2003, Full automatic registration of laser scanner point clouds, *Optical 3-D Measurement Techniques VI*, Zurich, Swithzerland, September 22-25, vol. 1, 330-337.

Altuntaş, C. ve 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.

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

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

Al-MAnasir, K. and Fraser, C.S., 2006b, Automatic registration of terrestrial laser scanner data via imagery, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (IAPRS)*, 36(5), Dresden, September, 25-27.

Aquilera, 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. and 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. and McKay, N.D., 1992, A method for registration of 3-D shapes, *IEEE Transsactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(2), 239-256.

Boehler, W., Vicent M.B. and Marbs, A., 2003, Investigating laser scanner accuracy, *XIXth CIPA Symposium*, Antalya, 30 Sep.-4 Oct., Turkey, CD-Rom.

Brenner, C., Dold, C. and Ripperda, N., 2008, Coars orientation of terrestrial laser scans in urban environments, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63(2008), 4-18.

Briese, C. and Pfeifer, N., 2008, Line based reconstruction from terrestrial laser scanning data, *Journal of Applied Geodesy*, 2(2008), 85-95.

Chen, Y. and Medioni, G., 1992, Object modelling by registration of multiple range images, *Image and Vision Computing*, 10(3), 145–155.

Cronk, S., Fraser, C. and Hanley, H., 2006, Automated metric calibration of colour digital cameras, *The Photogrammetric Record*, 21(116), 355-372.

Deveau, M., Deseilligny, M.P., Paparoditis, 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

Dold, C. and Brenner, C., 2006, Registration of terrestrial laser scanning data using planar patches and image data, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (IAPRS)*, 36(5), Dresden, 78-83.

Elkhrachy, I. and Niemeier, W., 2006, Optimization and strength aspects for geo-referencing data with terrestrial laser scanner systems, *3rd IAG/12th FIG Symposium*, Baden, 22-24 May 2006, CD-Rom

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., 2003, Fusion of photogrammetric imagery and laser scanner point clouds, procedings, *7th South Asian Surveying Congress*, Hong Kong, 3-7 November, CD-Rom.

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

Forkuo, E. K., 2005. Automatic fusion of photogrammetric imagery and laser scanner point clouds, *Ph.D. Thesis, The Hong Kong Polytechnic University*, 213 pages.

Förstner, W. and Gülch, E., 1987, A fast operator for detection and precise location of distinct points, corners and centers of circular features, *In Proceeedings of ISPRS Intercommission Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data*, Interlaken, 281-305.

Gruen, A. and Akca, D., 2005, Least squares 3D surface and curve matching, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 59(2005), 151-174.

Harris, C. and Stephens, M., 1988, A combined corner and edge detector, *Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference*, Manchester, UK, 147–151.

Kadobayashi, R., Kochi, N., Otani, H. and Furukawa, R., 2004, Comparison and evaluation of laser scanning and photogrammetry and their combined use for digital recording of cultural heritage. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (IAPRS)*, *35(5)*, Istanbul, Turkey, 401-406.

Kang, Z., Zlatanova, S. and Gorte B., 2007, Automatic registration of terrestrial scanning data based on registered imagery, *FIG Working Week*, 13-17 May, Hong Kong SAR, China, 1-11.

Kang, Z., Li, J., Zhang, L., Zhao, Q. and Zlatanova, S., 2009, Automatic registration of terrestrial laser scanning point clouds using pnoramic reflectance images, *Sensors*, 9(2009), 2621-2646.

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 baseb 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. and 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.

Li, T., 2005, A robust image based method for 3d registration, *Proceeding of Fifth Internatioal Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM'05)*, June 13-16, Ottawa, Canada, 270-276.

Lichti, D.D. and Gordon, S.J, 2004, Error propagation in directly georeferenced terrestrial laser scanner point clouds for cultural heritage recording, *Proceedings of FIG Working Week*, Athens, Greece, 22-27 May 2004, 1-16.

Liu, Y., 2006, Automatic registration of overlapping 3d point clouds using closest point, *Image and Vision Computing*, 24(2006), 762-781.

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

Optech, 2010, Industrial and 3D imaging, http://www.optech.ca/pdf/Ilris_LR_Spec_ Sheet_100914_new_web.pdf, [8 Kasım 2010].

Pfeifer, N. and Briese, C., 2007, Geometrical aspects of airborn laser scanning and terrestrial laser scanning, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (IAPRS)*, 36(3/W52), Espoo, Finland, 311-319.

Remondino, F. and Fraser, C., 2006, Digital camera calibration methods: considerations and comparisons, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (IAPRS)*, 36(5), Dresden, 266-272.

Ressl, C., 2003, "Geometry, constraints and computation of the trifocal tensor", *PhD Thesis, Reviewer: W. Förstner, H. Pottmann; Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung*, 40-50.

Scaioni, M., 2002, Independent model triangulation of terrestrial laser scanner data, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (IAPRS)*, 34(5/W12), 308-313.

Scaioni, M., 2005, Direct georeferencing of tls in surveying of complex sites, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (IAPRS)*, Vol.36, Part 5/W17, in CD-Rom.

Schuhmacher, S. and Boehm, J., 2005, Georeferencing of terrestrial laser scanner data for applications in architectural modeling**,** *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (IAPRS)*, 3D-ARCH, Mestre-Venice, Italy, 22-24 August, in CD-Rom.

Sheng, Y., 2004, Comparative evaluation of iterative and non-iterative methods to ground coordinate determination from single aerial images, *Computer &Geoscience*, 30(2004), 267-279.

Tournas, E. and Tsakiri, M., 2009, Automatic 3D point cloud registration for cultural heritage documentation, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (IAPRS)*, 38(3/W8), Paris, France, September, 1-2.

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.

Yıldız, F. ve Altuntaş, C., 2009, Yersel lazer tarayıcı nokta bulutlarının jeodezik koordinat sistemine dönüştürülmesi, *Harita Dergisi*, Sayı 142, 51-58.

Zhang, Z., 1994, Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces, *International Journal of Computer Vision*, 13(2), 119–152.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Cihan ALTUNTAŞ
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : Ordu / 1971
Telefon : 0332 2231894
Faks : 0332 2410635
e-mail : caltuntas@selcuk.edu.tr

EĞİTİM

Derece		Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	:	**Merkez Kabadüz Lisesi, Ordu**	**1988**
Üniversite	:	**Selçuk Üniversitesi, MMF, Jeod.Fot.Böl., Konya**	**1998**
Yüksek Lisans	:	**Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Ens., Konya**	**2002**
Doktora	:	**Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Ens., Konya**	

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
1998-2000	**Selçuk Üniversitesi, MMF, Jeod.Fotog.**	**Araş. Gör.**
2001-2002	**Özel sektör**	**Harita Mühendisi**
2002-2005	**Selçuk Üniversitesi, Sarayönü MYO**	**Öğretim Görevlisi**
2005-	**Selçuk Üniversitesi, MMF, Jeod.Fotog.**	**Araş. Gör.**

UZMANLIK ALANI

Fotogrametri, Yersel Lazer Tarayıcılar, 3B Modelleme

YABANCI DİLLER

İngilizce

BURSLAR VE ÖDÜLLER

TÜBİTAK-BİDEB 2214 Yurt Dışı Araştırma Bursu. Vienna University of Technology, Enstitute of Photogrammetry and Remote Sensing, 2009 (6 ay).

1995-1996 Selçuk Ün. Müh.Mim.Fak. Jeod.ve Fotog.Müh. ara sınıflar birinciliği ödülü
1995-1996 Selçuk Ün. Müh.Mim.Fak. Fakülte ikinciliği ödülü
1997-1998 Selçuk Ün. Mü.Mim.Fak. Jeod.ve Fotog.Müh. bölüm birinciliği mezuniyet ödülü
1997-1998 Selçuk Ün. Müh.Mim.Fak. Fakülte ikinciliği mezuniyet ödülü

YAYINLAR

Yurtiçi dergilerde yayınlanan makaleler

1. Altuntaş, C., Pfeifer, C., Ressl, C., Yıldız, F., 2010. Yersel lazer tarayıcılara kamera takılması ve lazer tarayıcı koordinatlarına göre kamera konumunun hesaplanması, *Harita Dergisi*, Sayı 144, 64-72. (Doktora Tezinden yapılmıştır)

2. Yıldız, F., Altuntaş, C., 2009. Yersel lazer tarayici nokta bulutlarinin jeodezik koordinat sistemine dönüstürülmesi, *Harita Dergisi*, Sayi 142, Temmuz 2009, 51-58.

3. 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. (Doktora Tezinden yapılmıştır)

4. İnal, C., Çorumluoğlu, Ö., Şanlıoğlu, İ., Altuntaş, C., 2002. Hacim hesapları için GPS ölçülerinin klasik ölçmeler yerine kullanılabilirliği, *Selçuk Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 17(1), 35-41.

Hakemli konferans/sempozyumların bildiri kitaplarında yer alan yayınlar

1. Altuntaş, C., Pfeifer, N., Yildiz, F., 2010. Estimation of exterior parameters of sensor combination for efficiant 3D modeling, *International Archive of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII, Part 5, Commission V Symposium, Newcastle upon Tyne, UK, 23-28. (Doktora Tezinden Yapılmıştır)

2. Yıldız, F., Altuntaş, C., 2009. Yersel lazer tarayıcı ölçülerinin jeodezik koordinat sistemine dönüştürülmesi, *TUFUAB V. Teknik Sempozyumu*, Ankara, 4-6 Şubat 2009.

3. Altuntas, C., Yildiz,F., 2008. Registration of terrestrial laser scanner point clouds by one image, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Sptial Inormation Sciences*, 37(B5),Beijing, 597-600.

4. Karabork, H., Baykan, O.K., Altuntas, C., Yildiz, F., 2008. Estimation of unknown height with artificial neural network on digital terrain model, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Sptial Inormation Sciences*, 37(B3b), Beijing,115-118.

5. Yildiz, F., Karabork, H., Yakar, M, Altuntas, C., Karasaka, L., Goktepe, A., 2007. 3D modeling by advenced total station, *XXI th International CIPA Symposium*, 01-06 October, Athens, Greece, 749-751.

6. Karabork, H., Yildiz, F., Yakar, M., Altuntas, C., Karasaka, L., 2007. Modeling and visualization using laser scanner in documentation of cultural heritage, *XXI th International CIPA Symposium*, 01-06 October, Athens, Greece, 415-417.

7. Goktepe, A., Yildiz, F., Karabork, H., Yakar, M., Altuntas, C., Karasaka, L., 2007. Documentation of the Zazadin Inn with laser scanning, *XXI th International CIPA Symposium*, 01-06 October, Athens, Greece, 235-237.

8. Altuntas, C., Yildiz, F., Karabork, H., Yakar, M., Karasaka, L., 2007. Surveying and documentation of detailed historical heritage by laser scanning, *XXI th International CIPA Symposium*, 01-06 October, Athens, Greece, 2007, 58-60.

9. Altuntaş C., Yildiz F., Karabork H., Yakar M., 2007. Yersel lazer tarayıcı nokta bulutlarının birleştirilmesinde bağımsız model dengelemesinin doğruluk analizi üzerine bir çalışma, *Türkiye Ulusal Fotogrametri ve Uzaktan Algılama Birliği IV. Sempozyumu*, 5-7 Haziran, İstanbul, in CD-Rom.

10. Karasaka, L., Yildiz, F., Yakar, M., Karabork, Altuntas, C., Yilmaz, H.M., 2006. Photogrammetric methods for documentation based on detailed drawing of historical and cultural heritage, *Fifth International Symposium Turkish-German Joint Geodetic Days*, 29-31 March, Berlin, in CD-Rom.

11. Altuntas, C., Yildiz, F., Yakar, M., Karabork, H., Karasaka, L., Yilmaz, H.M., 2006. Photogrammetric methods in documentation of cultural heritage in macro dimension: A case study of the Zazadin Inn, *Fifth International Symposium Turkish-German Joint Geodetic Days*, 29-31 March, Berlin, in CD-Rom.

12. Corumluoglu, O., Kalayci, I., Durduran, S., Altuntas, C., Asri, I., Onal, A., 2004. GPS virtual station technique (GPSSIT) and its challenge in terestrial photogrammetric applications, *The ISPRS International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35(B5/V), 494-497.

13. Altuntaş, C., Çorumluoğlu, O., 2002. Uzaktan algılamada digital görüntü işleme ve RSImage yazılımı, *Selçuk Üniversitesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendsiliği Öğretiminde 30. Yıl Sempozyumu*, 16-18 Ekim, Konya, 434-442. (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır)