

## Yersel Lazer Tarayıcı Ölçme Prensipleri ve Nokta Bulutlarının Birleştirilmesi

Cihan ALTUNTAŞ<sup>1</sup>, Ferruh YILDIZ<sup>2</sup>

### Özet

*Bilim ve teknolojiadaki gelişmeler, ölçme tekniklerindeki gelişmeleri de beraberinde getirmektedir. Ölçme alanında geliştirilen en son tekniklerden birisi de lazer tarama tekniğidir. Diğer ölçme yöntemleriyle kıyaslandığında, lazer tarayıcılarla, ölçülen alanın 3 boyutlu (3B) nokta verileri çok kısa sürede ve istenilen sıklıkta elde edilebilmektedir. Bu nedenle 2000 li yılların başında geliştirilen lazer tarama yönteminin arazi ölçmelerinde ve mimari röleve çalışmalarında kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Ölçme teknolojisindeki gelişmeler, veri işleme ve sunumunda da yeni teknikleri beraberinde getirmiştir. Lazer tarama yöntemiyle elde edilen verilerin işlenmesinde en önemli adımlardan birisi, elde edilen 3B nokta bulutlarının birleştirilmesidir. Bu çalışmada, yersel lazer tarayıcıların ölçme prensipleri incelenmiş ve elde edilen nokta bulutlarının birleştirilmesinde kullanılan yöntemler anlatılmıştır.*

### Anahtar Sözcükler

Yersel Lazer Tarayıcı, Nokta Bulutu, En Küçük Karelerle 3B Yüzeyselme, Bağımsız Model Yöntemi, İteratif En Yakın Nokta.

### Abstract

#### Survey Principles of Terrestrial Laser Scanners and Combination of 3D Point Clouds

*Technological developments are bringing about new survey techniques. Laser scanners are the latest technique developed in surveying discipline. Terrestrial laser scanners, when compared to the other surveying techniques, are able to survey the 3D surface by acquiring a large amount of data in a shorter time and as often as required. Use of laser scanning method has been growing in land and architectural survey since the early 2000s. Developments in surveying technology have given rise to emerging new techniques in data processing and presentation. The most important step in processing data from laser scanners has been the combination of 3D point clouds. This study gives the details of investigation on surveying principles of terrestrial laser scanners and the methods utilized in combining the point clouds obtained.*

### Keywords

Terrestrial Laser Scanner, Point Cloud, Least Squares 3D-Matching, Independent Model Triangulation, Iterative Closest Point.

### 1. Giriş

Yersel lazer tarama, geleneksel ölçme teknikleri ile kıyaslandığında 3B nokta bilgilerinin çok yüksek hızla elde

edilebildiği bir ölçme tekniğidir. Ölçme alanının 3B nokta bilgileri, nokta dizileri şeklinde yüksek doğrulukla ölçülebilmektedir. Yersel lazer tarayıcılar pek çok ölçme uygulamasında, özellikle tarihi yapıların röleve çalışmalarında giderek artan bir oranda kullanılmaktadır.

Yersel lazer ölçmelerinde temel büyüklük, alet ve ölçülen nokta arasındaki mesafedir. Lazer mesafe ölçümü için farklı teknikler kullanılmaktadır. Bunlar; üçgenleme, faz farkı ölçümü, ışığın gidiş/dönüş zamanı ölçümü ya da puls metodudur. Yersel lazer tarayıcılarda, kısa zaman aralıklarıyla lazer pulslarının gönderilmesi ve ölçülmesi esasına dayanan puls metodu kullanılmaktadır (LICHTI ve GORDON 2004).

Sensör teknolojisi ve bununla ilgili yazılım araçlarındaki hızlı gelişme; mühendislik çalışmaları, tarihi ve kültürel eserlerin dokümantasyonu ve kent alanlarının 3B modellenmesi, madencilik çalışmaları, deformasyon analizi ve orman alanları ölçümü gibi pek çok alanda geometrik verilerin elde edilmesinde yersel lazer taramayı önemli bir yöntem haline getirmiştir. Yersel lazer tarama tekniklerinin ortaya çıkmasıyla birlikte; sensör modelleme, detay çıkarma, nokta bulutu (point cloud) oluşturma, veri birleştirme ve diğer pek çok alanda yeni araştırma alanları ortaya çıkmıştır.

Yakın resim fotogrametrisi ve yeni bir teknoloji olan yersel lazer tarama tekniğinin birlikte kullanılması 3B model oluşturmada, obje sınıflandırmada ve sanal gerçeklik uygulamalarında yeni fırsatlar ortaya çıkarmıştır. Lazer tarama teknolojisi ve yakın resim fotogrametrisi, birbirini tamamlayıcı yöntemler olarak görülebilir. Örneğin, yersel lazer tarayıcılarla bir objenin 3B bilgileri çok yüksek çözünürlükte ve hızlı bir şekilde elde edilebilir. Aynı bilgiler yakın resim fotogrametrisi kullanılarak da elde edilebilir ancak, yakın resim fotogrametrisinde aynı bilgilerin elde edilmesi bir operatörün çok yoğun çalışmasını gerektirir. Yersel lazer tarayıcılar çok yüksek çözünürlükte değildir, oysa yakın resim fotogrametrisinde yüksek çözünürlüklü digital kameralar kullanılır. Yersel lazer tarayıcılar aletin kurulabildiği zemin noktasından belli yatay ve düşey açılar altında objeyi görüntüleyebilirken, kamera obje etrafında hareket ettirilerek objenin tamamı görüntülenebilir (FORKUNO ve KING 2004).

Lazer tarama işlemiyle elde edilen nokta bulutundan; temel ölçme verileri, ortofoto görüntüler, 2 veya 3 boyutlu çizimler, 3B animasyon, katı yüzey modelleri yada doku giydirilmiş 3B modeller elde edilebilir. Etkin bir veri toplama tekniği olan lazer tarayıcılar hem ölçmecilere hem de bu ölçüleri

<sup>1</sup>Arş. Gör., <sup>2</sup>Prof. Dr., Selçuk Üniversitesi, Müh.Mim.Fak., Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü, 42075 Selçuklu/Konya

kullanımlara büyük kolaylıklar sağlar. Lazer tarama yönteminin avantajları;

- Hızlı ve obje ile temas kurmadan ölçme,
- Aynı ölçme alanı için daha fazla veri toplama,
- Lazer ölçülerinin var olan başka tür ölçülerle kolayca entegrasyonu,
- Daha güvenli veri toplama imkanı,
- Yüksek doğruluklu DTM üretebilme,
- Gerçek renkli görüntü üretebilme,
- Ölçme alanının belirli periyotlarla tamamen ölçülebilmesi

olarak sıralanabilir (WAGGOT vd. 2005).

Yersel lazer tarama yöntemi mevcut ölçme yöntemleriyle birlikte kullanılabilir ve ölçüler diğer ölçme verileriyle entegre edilebilir. Küçük objeler, mimari detaylar, bina cepheleri, fabrika ve mühendislik uygulamaları ve daha pek çok alanda kullanılabilecek farklı tip ve türde tarayıcılar mevcuttur. Yersel lazer tarayıcı ölçüleri, tarayıcı alet merkezli 3B nokta bulutu şeklindedir. Objenin tamamı tek bir noktadan taranamıyorsa değişik noktalardan yapılan ve her biri tarayıcı alet orijini yerel koordinat sisteminde olan nokta bulutlarının bütünü oluşturacak şekilde birleştirilmesi gereklidir. Bu çalışmada, yersel lazer tarayıcıların ölçme prensipleri incelenmiş ve elde edilen nokta bulutlarının birleştirilmesinde kullanılan yöntemler anlatılmıştır.

## 2. Yersel Lazer Tarayıcılar

Lazer tarayıcılarla, ölçülecek alanın 3B nokta verileri istenilen aralıklarla çok yüksek hızla ölçülür. Tarayıcıların tarama teknikleri satır tarama yada sütun tarama şeklinde olabilir. Tarayıcıların çoğu ölçülecek alanın tamamı için satır yada sütunlar oluşturacak şekilde hareket ederek tarama yapar. Bunlardan farklı olarak Optech Ilris 3D lazer tarayıcı aleti ölçülecek alanı fotoğraf karelerine böler ve her fotoğraf karesini bir sonraki fotoğraf karesi ile bindirmeli olarak yatay satırlar halinde tarar. Tarayıcının veri aktarma yazılımı (Parser),

görüntü eşleme tekniği ile her bir fotoğraf karesine düşen taramaları bir sonraki tarama ile birleştirerek o noktadan yapılan taramanın bütünü oluşturur. Tarama tekniği aletlerin doğrulukları ile ilgili olmayıp daha çok fonksiyonel olmalarıyla ilgilidir.

Pek çok marka ve modelde lazer tarayıcı bulunmaktadır (Optech, Riegl, Leica, Zoller+Fröhlich, Faro, Mensi, I-Site, vb.). Bunlardan bazılarında ait teknik özellikler Tablo 1 de verilmiştir. Tabloda verilen ışınsal açıklık aynı zamanda taranabilecek en küçük tarama aralığını da ifade etmektedir. Bu tarayıcıların ölçme prensipleri aynı olmakla birlikte ölçme uzunlukları, fonksiyonları ve kullanılışlarında farklılıklar bulunmaktadır. Tarayıcıların çoğunda bulunan digital kameralar sayesinde ölçülen noktalara renk değeri atanarak renkli nokta bulutu elde edilebilmektedir.

### 2.1. 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 sağlar (LICHTI ve GORDON 2004). Her lazer noktası için tarayıcı alet merkezli kutupsal koordinatlar ölçülür. Bunlar; ölçülen noktaya olan eğik uzaklık  $\rho$ , ölçüm doğrusunun x eksenine yatay düzlemde yaptığı açı  $\alpha$  ve ölçüm doğrusunun yatay düzlemde yaptığı eğim açısı  $\theta$  dir. Aynı zamanda ölçülen yüzeyin yapısına ve ölçme uzaklığına bağlı olarak dönen sinyalin yoğunluğu da ölçülerek kaydedilir.

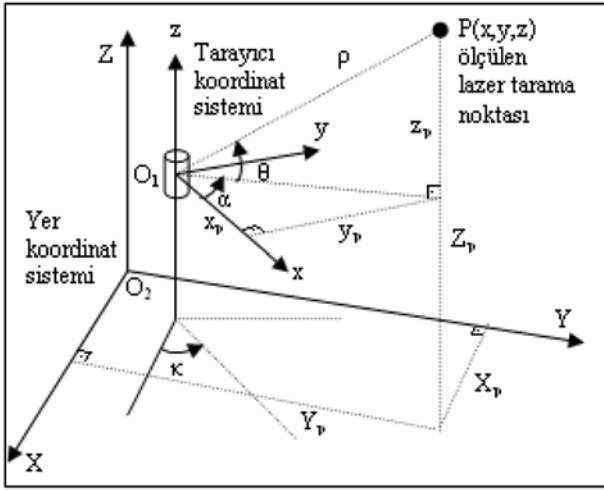
Yersel lazer tarayıcılarla ölçülen büyüklükler ve tarayıcı koordinat sistemi Şekil 1 de görülmektedir.

Şekil 1 de;

- x,y,z: Tarayıcı alet orijini nokta bulutu koordinatları,
- $\rho$ : Lazer tarayıcı ile ölçülen obje noktası arasındaki eğik mesafe,
- $\alpha$ : Işın doğrultusunun x eksenine yatay düzlemde yaptığı açı,
- $\theta$ : Işın doğrultusunun yatay düzlemde yaptığı eğim açısı,
- $O_1$ : Lazer tarayıcı yerel koordinat sistemi merkezi,
- $O_2$ : Yer koordinat sistemi merkezidir.

Tablo 1: Bazı lazer tarayıcılar ve teknik özellikleri (URL1, URL2, URL3, URL4, URL5)

Marka	Model	Ölçme Mesafesi(m)	Ölçme hızı	Tarama Açısı	Mesafe doğruluğu	Konumsal doğruluk	Işınsal açıklık
Optech	Ilris 3D	3m-1500m (%80 yansıtıcı yüzey)	2500 nokta/san	310° (V) 360° (H)	7 mm @ 100 m	8 mm @ 100 m	0.00974°
Riegl	LMS-Z420	2m-1000m (%80 yansıtıcı yüzey)	12000nok/san	0-80°(V) 0-360°(H)	8mm@50m	10mm@50m	0.25mrad
	LMS-Z390	1m-300m (%80 yansıtıcı yüzey)	11000nok/san	0-80°(V) 0-360°(H)	4mm@50m	6mm@50m	0.25mrad
	LMS-Z210	4m-650m (%80 yansıtıcı yüzey)	12000nok/san	0-80°(V) 0-360°(H)	10mm@50m	15mm@50m	2.7mrad
Leica	Scan Station	300m (%90 yansıtıcı yüzey)	4000 nokta/san	270° (V) 360° (H)	4mm@ 50m	6mm@ 50m	4mm@50m
	HDS3000	300m (%90 yansıtıcı yüzey)	4000nok/san	270° (V) 360° (H)	4mm@ 50m	6mm@ 50m	4mm@50m
	HDS4500 (53m)	53.5m	500000nok/san	310° (V) 360° (H)	5mm+120ppm (%100 yan.y)	13.7m@25m (%100 yan.y)	8.5mm@25m
	HDS6000	79m (%80 yansıtıcı yüzey)	500000nok/san	310° (V) 360° (H)	5mm@ 50m	10mm@ 50m	3mm+0.22mrad
Z-F	Imager5006	1m-79m	500000nok/san	310° (V) 360° (H)	0.1mm@50m	1mm@50m	0.22mrad
Faro	LS 880	1m-80m	120000nok/san	320° (V) 360° (H)	3mm	5mm	0.01°



Şekil 1: Yersel lazer tarayıcı ölçüleri, tarayıcı koordinat sistemi ve yer koordinat sistemi.

Bu ölçüler arasındaki geometrik ilişki ve taranan noktaların tarayıcı alet orijinli 3B koordinatları (x,y,z), aşağıdaki gibi ifade edilebilir (ELKHRACHY ve NIEMEIR 2006, SCAIONI 2005, LICHTI ve GORDON 2004).

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \rho \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \alpha \\ \cos \theta \sin \alpha \\ \sin \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

Lazer tarayıcı nokta bulutları ölçülen alanı gerçek ölçüleri ile temsil ettiği için objenin 1:1 ölçekli 3B modeli olarak da düşünülebilir.

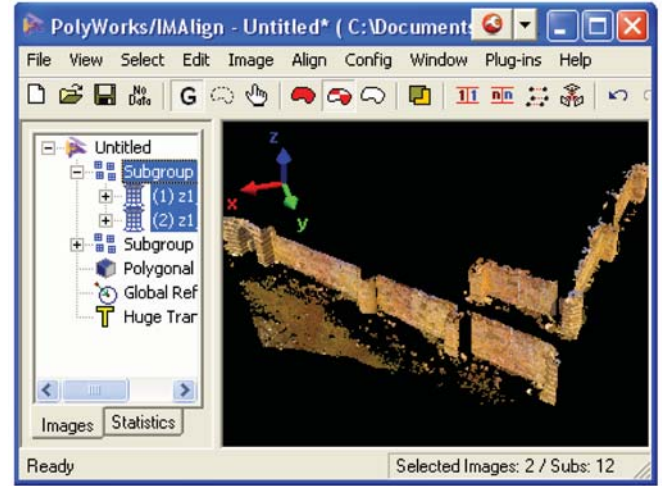
Yersel lazer tarayıcıların total stationlar gibi belirli bir noktaya kurulup yönlendirilmeleri mümkün olmadığı için tarayıcı merkezli x,y,z eksenleri her defasında farklı bir doğrultuyu gösterecektir (Bazı aletlerde sadece nokta üzerine kurulabilme özelliği vardır). Bu nedenle bir alan için yapılan bütün taramalar ortak bir koordinat sisteminde birleştirilmelidir. Tarayıcı ile bütünleşik yapıda dijital kamera kullanılıyorsa bu durumda ölçülen her nokta için RGB kaydı da yapılabilir (Şekil 2).



Şekil 2: Lazer tarayıcıdan elde edilen 3B renkli nokta bulutu görüntüsü (Zazadın Han-Konya)

Mimari röleve için bir binanın dış yüzeyleri taranacaksa, 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 (Şekil 3). Bazı ölçme ve hesaplama tekniği hariç, bu ortak taranmış alanlar nokta kümelerinin birleştirilmesi için gereklidir. Tarama işlemleri esnasında çoğu tarayıcının koordinatı bilinen nokta üzerine kurulması ve düzeçlenmesi donanım olarak mümkün değildir ve buna gerek de yoktur. Tarayıcı alet orijinli x,y,z nokta bulutu koordinatları, ek ölçüler ve hesaplamalarla jeodezik koordinat sistemine yada başka bir referans koordinat sistemine dönüştürülür. Nokta bulutlarının birleştirilmesi ve jeodezik koordinat sistemine dönüştürülmesi 3. bölümde ele alınmıştır.



Şekil 3: Aynı objenin iki farklı noktadan bindirmeli olarak taranmış nokta bulutları

## 2.2. Lazer Tarayıcıların Doğruluğu

Lazer tarayıcılarla ölçülen her nokta bulutu çok sayıda raslantısal hata içerir. Bu hatalar; ışın yansımaları ve ışın kalınlığından kaynaklanan ölçme sistemi hatalarıdır. Ölçüler jeodezik koordinat sistemine dönüştürülecekse bu hatalara dönüşümde kullanılan noktaların hataları da eklenmektedir (LICHTI ve GORDON 2004). Taranan noktaların doğruluğunu tarayıcının açısal doğruluğu, mesafe doğruluğu, çözünürlüğü, kenar etkisi yani ışın kalınlığı, yansıyan sinyal gücü ile sıcaklık, atmosferik koşullar ve radyasyon gibi çevresel koşullar etkiler.

Lazer ışın kalınlığından dolayı obje kenarına çarpan ışının bir kısmı geri dönerken bir kısmı da diğer yüzeyden geri yansıyacaktır. Bu durumda aynı lazer ışını için iki farklı ölçü noktası elde edilecektir. Bu hata, lazer ışın kalınlığının azaltılması ile en aza indirilebilir.

Tarayıcılardan gönderilen ve obje yüzeyinden dönen sinyaller kaydedilerek objenin gri tonlu yansıma görüntüleri oluşturulmaktadır. Yansıyan sinyalin gücü, yüzeyin parlaklığı, mesafe, atmosferik koşullar ve ışığın geliş açısına göre değişir. Beyaz yüzeylerden yansıma çok fazla olurken, siyah yüzeylerden yansıma çok az olmaktadır. Renkli yüzeylerde yansıma etkisi, lazer tarayıcının spektral özelliğine (yeşil, kırmızı, kızılötesi) bağlı olarak değişir (BOEHLER vd. 2003).

Atmosferik koşulların kısa mesafelerde etkisi çok azdır. Toz ve su buharı lazer ışın kalınlığından dolayı ölçüleri etkileyecektir. Bu hata obje kenarlarında lazer ışın kalınlığından

dolayı kaçınılmaz olarak oluşan ölçü hatalarıyla aynı büyüklüktedir. Bu hatanın giderilmesi, ancak lazer nokta büyüklüğünün minimuma indirilmesiyle mümkündür.

Bir lazer tarayıcı, ancak kendi çalışma sıcaklığında optimum olarak çalışır. Sıcaklık, kendi çalışma aralığında olsa bile mesafe ölçümünde etkili olabilir. Tarayıcının iç sıcaklığı, çalışma ve radyasyon nedeniyle dış sıcaklıktan bir miktar fazla olacaktır. Lazer tarayıcı aletlerin çoğu, çalışma sıcaklığı belirlenen aralığı aştığında otomatik olarak kapanmaktadır.

Lazer tarayıcıların doğruluk araştırmasıyla ilgili pek çok metod geliştirilmiş ve sonuçları yayınlanmıştır (BOEHLER vd. 2003, JOHANSSON 2002, LICHTI vd. 2000). Doğruluk araştırması için en iyi test alanı ve programı Almanya'da Mainz-University of Applied Sciences'da geliştirilen test alanıdır (ZWEYER 2006). Bu test alanında değişik lazer tarayıcıların mesafe ve yansıma ölçümlerine ilişkin test sonuçları Şekil 4 de verilmiştir. Sonuç olarak, lazer tarayıcıların ölçü doğruluğu uzun mesafelerde (>1000m) 10cm, ışın yapısına bağlı olarak azalsa da kısa mesafelerde (<300m) ölçü hassasiyeti 1cm civarındadır. Genel olarak, Şekil 4'den de görüldüğü gibi mesafe ölçme ve konum hatası 100m de 1cm nin altında kalmaktadır.

### 3. Yersel Lazer Tarayıcı Nokta Bulutlarının Birleştirilmesi

Lazer tarayıcılarla binaları, tarihi eserleri yada başka alanları

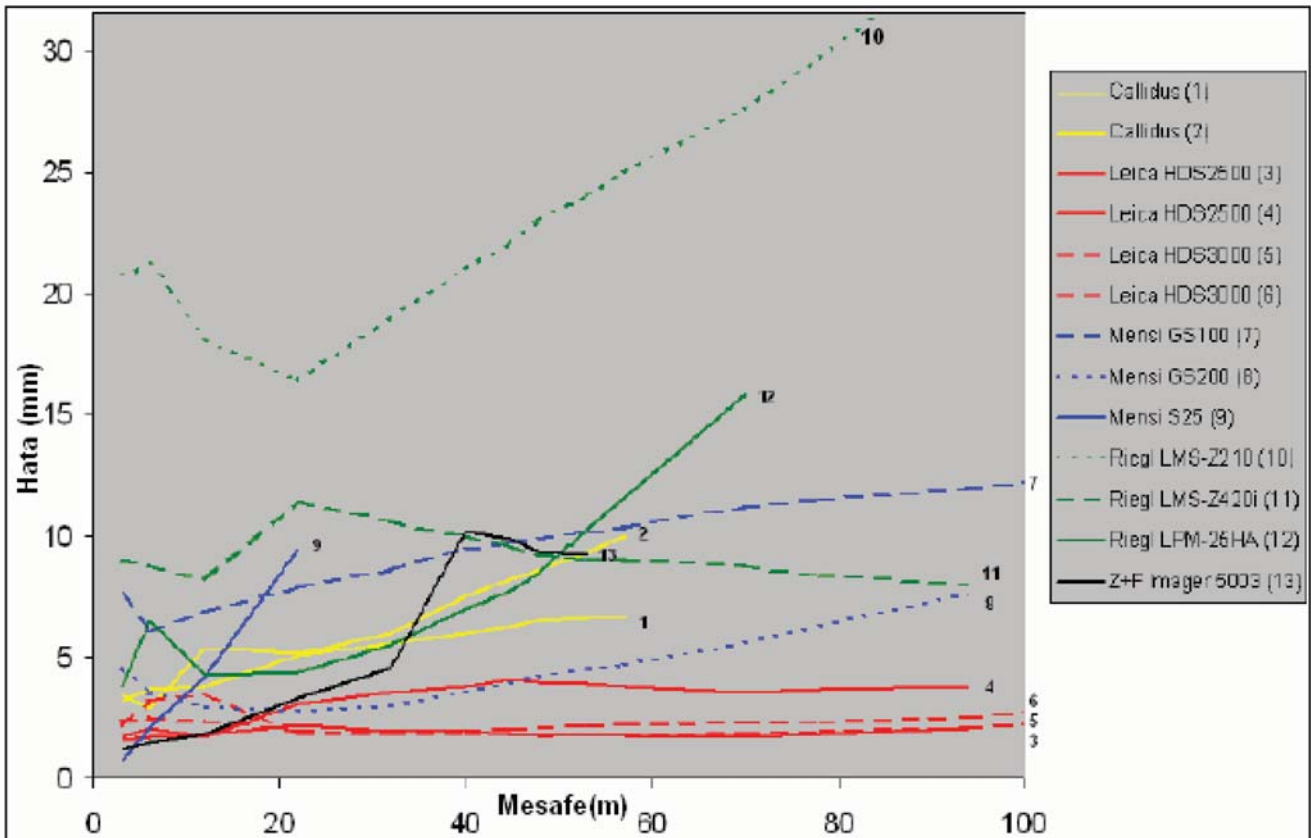
tümüyle görüntüleyebilmek için değişik noktalardan çok sayıda tarama yapılır. Her bir taramadan elde edilen nokta bulutunun koordinatları, tarayıcı alet merkezli lokal koordinatlarıdır. Objenin 3B modelini oluşturmak için bütün nokta bulutları, seçilen referans koordinat sisteminde birleştirilmelidir. Genellikle ilk taramanın koordinat sistemi referans olarak alınır. Bu durumda ilk taramadan sonraki taramaların referans koordinat sistemine 3B dönüşümlerinin yapılması gerekir.

Nokta bulutları jeodezik koordinat sistemine dayalı olarak da birleştirilebilir. Bunun için birleştirme ya doğrudan jeodezik koordinat sisteminde yapılır yada nokta bulutu içerisinde yeterli sayıda nokta tanımlanarak jeodezik koordinat sistemine dönüşüm yapılır. Jeodezik koordinatlar sayesinde yersel lazer tarayıcı nokta bulutlarının farklı yöntemlerle elde edilmiş veri kümeleri ile entegrasyonu da kolay olacaktır.

Nokta bulutlarının referans koordinat sisteminde birleştirilmesi aşağıdaki yöntemlerin birisiyle yapılabilir.

1. İteratif en yakın nokta (Iterative closest point) yöntemi,
2. En küçük karelerle 3B yüzey eşleme (Least square 3D matching) yöntemi,
3. Bağımsız model yöntemi (Independent model triangulation),
4. Doğrudan jeodezik koordinatlı ölçmeler (Direct georeferencing).

dir.

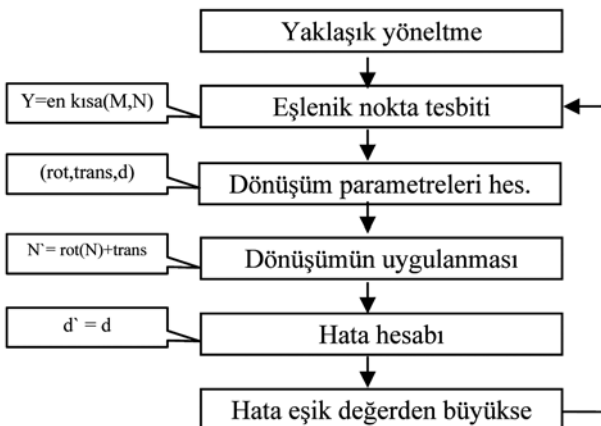


Şekil 4: Farklı lazer türleri için mesafe ölçüm doğruluğu (tek bir lazer noktası için) değerleri. Test Almanya da Mainz'de Uni.of Applied Sciences'da yapılmıştır (ZWEYER 2006).

Bu yöntemler alt başlıklar altında detaylı olarak anlatılmıştır. Bu dört yöntemden başka lazer tarayıcı nokta bulutlarının birleştirilmesinde; görüntü esaslı birleştirme (AL-MANASIR ve FRASER 2006), tarayıcı ile senkronize GPS kullanılması (WAGGOT vd. 2005) ve hareketli platformlardan GPS/IMU (inertial measurement unit) sistemi ile yapılan taramalar (TALAYA vd. 2004) ve değişik konfigürasyonlar içeren yöntemler kullanılmaktadır.

### 3.1 İteratif En Yakın Nokta Yöntemi

İteratif en yakın nokta yöntemi BESL ve MCKAY (1992) ve ZHANG (1994) tarafından geliştirilmiş ve bugüne kadar yöntemi geliştirecek çok sayıda çalışma yapılmıştır. Yöntemin farklı veri kümelerinde farklı şekillerde uygulanmasını içeren değişik türleri bulunmaktadır. (SHARP vd. 2002, GODIN vd. 2001, JOHNSON ve KANG 1996). Bu yöntemde nokta bulutları arasındaki 3B dönüşüm parametreleri iteratif olarak bulunur. Yöntem, referans nokta kümesi (M) ve araştırma nokta kümesi (N) aynı ölçekli kabul edilerek dönüşüm parametrelerinin en yakın nokta çiftleri ile bulunması temeline dayanır ve başlıca üç adımda uygulanır. Birinci adımda yüzeyler, aralarında benzerlik ilişkisi kurularak yaklaşık olarak yöneltilir. İkinci adımda, araştırma nokta kümesindeki her nokta için referans nokta kümesindeki en yakın nokta bulunarak noktalar eşleştirilir ve en yakın nokta çiftleri ile dönüşüm parametreleri hesaplanır. Üçüncü adımda, hesaplanan dönüşüm parametreleri araştırma nokta kümesinin bütün elemanları için uygulanarak dönüşüm yapılır. Bu üç adım, araştırma nokta kümesi referans nokta kümesi ile eşleştirilinceye kadar iteratif olarak devam eder. İlk yaklaşık değerler çok iyi seçildiğinde yöntem oldukça etkili bir yöntemdir. Dönüşüm, araştırma ve referans nokta kümeleri arasında Öklid mesafesi (3B uzayda iki nokta arasındaki doğrusal uzunluk) en kısa olan eşlenik noktalarla yapılır. Araştırma nokta kümesindeki noktaların referans nokta kümesindeki eşleniklerinin bulunması için araştırma nokta kümesine ait nokta ile referans nokta kümesinin bütün noktaları için Öklid mesafesi hesaplanır. Öklid mesafesi en küçük olan nokta o noktanın eşleniği olarak alınır. Bu yöntemin uygulanmasında temel işlem adımları aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 5: İteratif en yakın nokta yöntemi temel işlem adımları.

Yöntem, yaklaşık yöneltmesi yapılmış nokta bulutlarının dönüşüm parametrelerinin hesaplanmasında en çok kullanılan yöntemdir. Yoğun hesaplama gerektirmesine rağmen kolay uygulanabilmesi ve yüksek doğrulukta sonuç vermesi nedeniyle lazer taramalarının eşleştirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Genellikle 20 yada 30 iterasyondan sonra sonuca ulaşılmaktadır. İlk yaklaşık değerler iyi seçilirse ve şeklin belirgin geometrik özellikleri varsa 5-10 iterasyonda da sonuca ulaşılabilir.

### 3.2 En Küçük Karelerle 3B Yüzey Eşleme Yöntemi

En küçük karelerle 3B (EKK 3B) görüntü eşleme metodu, 2B görüntü eşleme algoritmasının genişletilerek 3B yüzeylerin eşlenmesinde kullanılması şeklinde GRUEN ve AKCA (2005) tarafından geliştirilmiş ve uygulamaları verilmiştir (AKCA ve GRUEN 2005, AKCA 2005, GRUEN ve AKCA 2005). Burada yöntemin uygulanmasıyla ilgili temel bağıntılar kısaca anlatılacaktır.

EKK 3B görüntü eşleme yöntemi, 3B referans penceresini bir yada daha fazla 3B araştırma penceresi ile yüzeyler arasındaki Öklid mesafelerinin kareleri toplamı minimum olacak şekilde eşleştirir. Aynı objeye, yüzeyinin iki farklı noktada bulutundaki karşılıklı elemanları  $f(x,y,z)$  referans penceresi ve  $g(x,y,z)$  araştırma penceresi olmak üzere problem;  $f(x,y,z)$  ye en iyi uyan  $g(x,y,z)$  yüzeyinin konumunun, dönüklüğünün ve şeklinin aranarak bulunması şeklinde tanımlanır. Rasgele hatalar,  $e(x,y,z)$  hata vektörü olarak stokastik modele dahil edilirse fonksiyonel model aşağıdaki şekilde olur.

$$f(x,y,z) + e(x,y,z) = g(x,y,z) \quad (2)$$

$g(x,y,z)$  nin konumu,  $g^o(x,y,z)$  nin yaklaşık değerinden başlayarak tekrarlı hesapla bulunur (GRUEN ve AKCA 2005).

Eşlenik yüzeyler arasındaki ilişkiyi ifade etmek için, aşağıdaki genel ortogonal 3 boyutlu dönüşüm eşitliğine göre 7 parametrelilik 3B benzerlik dönüşümü kullanılır:

$$[X \ Y \ Z]^T = m \mathbf{R}_{\omega,\phi,\kappa} [x \ y \ z]^T + [t_x \ t_y \ t_z]^T \quad (3)$$

Burada;

$[X \ Y \ Z]^T$  2. sistem koordinatları,

$\mathbf{R}_{\omega,\phi,\kappa}$  ortogonal dönüşüm matrisi elemanları,

$[t_x \ t_y \ t_z]^T$ : Öteleme vektörü

$[x \ y \ z]^T$  1. sistem koordinatları,

$m$ : Ölçek katsayısı,

dır.

(2) nolu eşitlik Taylor serisine açılıp lineer hale getirilirse ve (3) nolu eşitliğin değişkenlere göre türevi (2) nolu eşitlikte yerine yazılıp düzenlenirse aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$\begin{aligned} e(x,y,z) = & g_x dt_x + g_y dt_y + g_z dt_z \\ & + (g_x a_{10} + g_y a_{20} + g_z a_{30}) dm \\ & + (g_x a_{11} + g_y a_{21} + g_z a_{31}) d\omega \\ & + (g_x a_{12} + g_y a_{22} + g_z a_{32}) d\phi \\ & + (g_x a_{13} + g_y a_{23} + g_z a_{33}) d\kappa \\ & - (f(x,y,z) + g^o(x,y,z)) \end{aligned} \quad (4)$$

Gauss-Markoff modeline göre bütün noktalar için, lineer hale getirilmiş yukarıdaki hata denklemi yazılarak matematiksel model oluşturulmuş olur.  $(g_x, g_y, g_z, g(x,y,z))$  fonksiyonunun değişkenlere göre birinci türevleridir. (4) eşitliği matris notasyonunda yazılırsa,

$$e = Ax - l, \quad P \quad (5)$$

olur. Burada;

A: Katsayılar matrisi. (4) nolu eşitlikte bilinmeyenlerin katsayıları. n adet nokta için A matrisi nx7 boyutludur.  $x^T = [dt_x, dt_y, dt_z, dm, d\omega, d\phi, dk]$ : Bilinmeyenler vektörü  $I=f(x,y,z)-g^o(x,y,z)$ : referans ve araştırma pencereleri arasındaki Öklid mesafelerini içeren ölçü vektörüdür (GRUEN ve AKCA 2005).

Burada (2) nolu formülle verilen fonksiyonel model lineer değildir. Bilinmeyenlerin her biri için belirlenen bir minimum değer bulununcaya kadar çözüme iteratif olarak devam edilir. Her dengeleme sonunda bulunan bilinmeyenlerin değerleri bir sonraki dengelemede bilinmeyenler için yaklaşık değer alınır. İterasyon sonunda fonksiyonun minimum değere ulaşabilmesi için ilk yaklaşık değerlerin çok iyi seçilmesi gerekir (GRUEN ve AKCA 2005). Bilinmeyenlerin ilk yaklaşık değerleri herhangi bir yöntemle hesaplanabilir.

### 3.3 Bağımsız Model Yöntemi

Bu yöntemde nokta bulutları ölçme işleminin amacına bağlı olarak önceden tanımlı yersel koordinat sisteminde, yada lazer taramalarının referans alınan birisinin koordinat sisteminde birleştirilir. İlk durumda, bütün taramalarda yer kontrol noktalarının (YKN) bulunması gerekir. YKN kullanımı farklı zamanlarda yapılan lazer taramalarının birleştirilmesini, lazer noktalarının doğruluğunun artırılmasını, fotogrametrik ve topoğrafik ölçülerin bu ölçülerle birleştirilmesini sağlar. YKN aynı zamanda bağlama noktalarının uygunsuz dağılımından ve ölçü metodundan kaynaklanan dönüşüm hatalarını da azaltır.

Bütün modellerin yer kontrol noktalarına dayalı olarak koordinatlandırılması ölçü süresi ve maliyetini artıracığından lazer tarayıcıların kullanım avantajlarına da aykırı olacaktır. Bu nedenle nokta bulutlarının referans koordinat sisteminde birleştirilmesi için bağımsız model yöntemi geliştirilmiştir.

Bağımsız model yöntemi, hava nirengisi hesaplamalarında kullanılan bağımsız modeller yöntemine benzer olarak, farklı noktalardan alınan bütün 3B modellerin eş zamanlı dengelenmesi şeklindedir. Bağlama noktaları iki komşu modelin birbirine göre dönüklük ve ötelenmelerinin hesaplanmasını sağlarken, YKN modellerin verilen referans sistemine oturtulmasını sağlar. Yöntemin uygulanmasında ilk önce bilinmeyenlerin yaklaşık değerleri hesaplanır, daha sonra en küçük kareler yöntemi ile 3B modellerin bağımsız model dengelemesi yapılır. Bilinmeyenlerin yaklaşık değerleri lazer taramalarının ortak örtü alanında en az 3 adet bağlama noktası ile hesaplanabilir. Bağlama noktası olarak tarama alanında tesis edilen işaretler yada objenin doğal özellikleri kullanılabilir.

Bağımsız model dengelemesinden sonra her modelin (nokta kümesinin) dönüşüm parametreleri hesaplanmış olur. Bu parametrelerle (3) eşitliği kullanılarak her modelin referans koordinat sistemindeki koordinatları hesaplanabilir.

YKN ve bağlama noktalarının dağılımına bağlı olarak bağımsız model yöntemi farklı şekillerde uygulanabilir (SCAIONI 2002):

1. Bir modelin içerdiği YKN sayısı, modeli yönlendirmek için yeterli yada daha fazla sayıda ise bu modelden başlanarak yönlendirme işlemi yapılır.
2. YKN tüm alan için yeterli sayıda ancak herhangi bir nokta kümesi tek başına dönüştürülemez ve tüm bloğun dönüşümü yapılamıyorsa; bu durumda nokta kümelerinden birisi geçici referans sistemi alınır ve diğer bütün nokta kümeleri bu sisteme dönüştürülür. Referans olarak diğer nokta bulutları ile en fazla ortak nokta içeren nokta bulutu seçilir. Diğer nokta bulutlarının referans nokta bulutu ile birleştirilmesinden elde edilen blokta yeterli sayıda YKN olduğu anda bundan sonraki birleştirmeler bağımsız model yöntemine göre yapılır.
3. Nokta bulutları içinde hiçbir YKN bulunmuyorsa bu durumda kullanıcı tarafından seçilecek yada 2. maddede belirtildiği şekilde seçilecek bir nokta bulutu referans alınarak bütün nokta bulutları bu sisteme dönüştürülür.

Nokta bulutlarından birisinin referans alınması durumunda her nokta bulutu bir önceki nokta bulutunun koordinat sistemine dönüştürülerek bütün taramalar ortak bir koordinat sisteminde birleştirilir. Her modelin bir önceki model ile dönüklük parametreleri yeterli sayıda iterasyonla hesaplanarak nokta bulutları eşleştirilir ve bu şekilde bütün modeller tek bir blok halinde birleştirilmiş olur. Ancak böyle bir durumda küçük yönlendirme hataları kontrolsüz bir şekilde yayılarak bütün bloğu etkiler. Çünkü yönlendirme yapılan her nokta bulutu bir sonraki nokta bulutu için referans olarak alınır. Bu nedenle blok geometrisinin çok iyi olması yani YKN'nin blok içindeki dağılımının ideal olması blok deformasyonlarının kontrolünde ve dönüklük parametrelerinin belirlenmesinde etkili olacaktır (SCAIONI 2002).

### 3.4 Doğrudan Jeodezik Koordinatlı Ölçme Yöntemi

Diğer yöntemlerin teknik, ekonomik yada operasyonel nedenlerden dolayı uygulanmadığı durumlar için doğrudan jeodezik koordinatlı ölçüm yöntemi geliştirilmiştir (SCAIONI 2005). Bu bağlamda doğrudan jeodezik koordinatlı ölçü yapmayı gerektiren durumlar aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir.

1. Objenin geometrik şekli ve boyutları nedeniyle YKN tesisi mümkün olmayan yada YKN tesisinin çok pahalı olduğu geniş alanların ölçümünde (tünel, yol vb.),
2. Planlama yada şehir modelleme amaçlı düşük doğruluklu olarak geniş alanların 3B görüntülenmesi uygulamalarında,
3. YKN tesisinin çok zor yada mümkün olmadığı durumlarda.

Tünel, yol, maden işletmesi gibi çok büyük ve genellikle lokal kontrol imkanı dahi olmayan alanlarda, lazer taramalarının referans olarak seçilen bir taramanın koordinat sisteminde birleştirilmesi durumunda oluşacak model çok sayıda sistematik hata içerecektir. Bu sakıncayı gidermek için lazer tarayıcıdan elde edilen 3B model koordinatları jeodezik koordinatlara dönüştürülebilir. Bu ise çok sayıda YKN tesisini ve ölçüsünü gerektirecektir.

Lazer tarayıcı koordinat sistemi, lazer tarayıcı orijinli ve herhangi bir doğrultuya yönlendirilmiş bir koordinat sistemidir ve taramalar arasında ölçek faktörü 1 olarak alınabilir. Bu durumda bir noktanın yer referans sistemi koordinatı ve lazer tarayıcı koordinatları arasındaki bağıntı aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Şekil 1).

$$[X \ Y \ Z]^T = R_{\omega\phi\kappa} [x \ y \ z]^T + [t_x \ t_y \ t_z]^T \quad (6)$$

Burada;

$[X \ Y \ Z]^T$  : Yer koordinatları vektörü,

$R_{\omega\phi\kappa}$  : Alet ve yer koordinat sistemleri arasındaki dönüklük matrisi,

$[x \ y \ z]^T$  : Alet koordinatları vektörü,

$[t_x \ t_y \ t_z]^T$  : Alet koordinat sisteminin başlangıcının (alet kurulan nokta) yer koordinat sistemine göre koordinatlarıdır (SCAIONI 2005).

Bağıntıdan da görüleceği gibi her lazer taramasını jeodezik koordinat sistemine dönüştürmek için dönüklük matrisi  $R_{\omega\phi\kappa}$ 'nin ve  $t_x, t_y, t_z$  başlangıç noktası koordinatlarının hesaplanması gerekir. Bu değerlerin her lazer taraması işleminde hesaplanabilmesi için lazer taraması içerisinde en az 3 noktanın jeodezik koordinatlarının bilinmesi gerekir. Dönüşümün doğruluğunun artırılabilmesi için 3 ten fazla ortak nokta olmalıdır. Bunun yanında ölçülen alanın büyük ve detaylarının fazla olması çok sayıda YKN tesisini gerektirecektir. Bu durum lazer tarayıcıların kullanım avantajlarına uygun olmayacağı için lazer tarayıcıların doğrudan jeodezik koordinatlar cinsinden ölçü yapabilmesini sağlayan “doğrudan jeodezik koordinat” yöntemi geliştirilmiştir.

Üzerine monte edilen dürbün yapısı ile lazer tarayıcılar, nokta üzerine konulup düzeçlenebilir ve yatay bir doğrultuya yönlendirilerek normal bir teodolit gibi kullanılabilir (Şekil 6). Alet nokta üzerine kurulduğunda jeodezik koordinat sisteminin Z eksenini (H yüksekliği) ile alet koordinat sisteminin z eksenini çakışık olacaktır. Aletin orijin noktasının neresi olduğu kataloglardan ve kalibrasyon raporlarından alınarak nokta ile alet arasındaki H yükseklik farkı ölçülebilir. Tarayıcı, üzerine monte edilen dürbün ile koordinatı bilinen YKN'ye ( $X_{02}, Y_{02}$ ) yönlendirilebilir. Bu doğrultu aynı zamanda tarayıcı koordinat sisteminin x eksenini yönüdür. Bu durumda aletin xy düzlemi ile jeodezik koordinat sisteminin yatay düzlemdeki dönüklüğü  $\kappa$ 'dır. Bu durumda, yer koordinat sistemine göre başlangıç doğrultusu  $\kappa$  kadar dönük alet koordinat sistemi, z eksenini etrafında dönecektir. Tarayıcının düşey hareketi sadece x yada y eksenini etrafındaki dönme olarak modellenebilir. (Örneğin

(Şekil 6 da görülen Riegl marka tarayıcıda y eksenini etrafındadır). Tarayıcının dönme eksenini ile tarayıcı koordinat sisteminin  $O_1$  merkezi arasındaki farklar ( $e_x$  ve  $e_z$ ), tarayıcı aletlerin tanıtım broşürleri yada kalibrasyon raporlarından alınabilir (Şekil 6). Buna göre; bütün dönüklükler ve ötelemeler dikkate alındığında tarayıcı koordinatları ile jeodezik koordinatlar arasındaki bağıntı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir (SCAIONI 2005).

$$[X \ Y \ Z]^T = R_{\kappa} R_{\phi} ([x \ y \ z]^T - [e_x \ 0 \ e_z]^T) + [t_x \ t_y \ t_z]^T \quad (7)$$

Burada;

$R_{\kappa}$  : Z eksenini etrafındaki döndürme

$R_{\phi}$  : Y eksenini etrafındaki döndürme

$$\kappa = \arctan \frac{Y_{02} - Y_{01}}{X_{02} - X_{01}}$$

$$e = \begin{bmatrix} e_x - r_e \cos(\phi + \gamma) \\ 0 \\ e_z - r_e \sin(\phi + \gamma) \end{bmatrix}, \quad r_e = \sqrt{e_x^2 + e_z^2}, \quad \gamma = a \tan\left(\frac{e_z}{e_x}\right)$$

ve

$[X \ Y \ Z]^T$  : Ölçülen noktanın jeodezik koordinatları,  
 $[x \ y \ z]^T$  : Ölçülen noktanın tarayıcı alet orijinli yerel koordinatı,

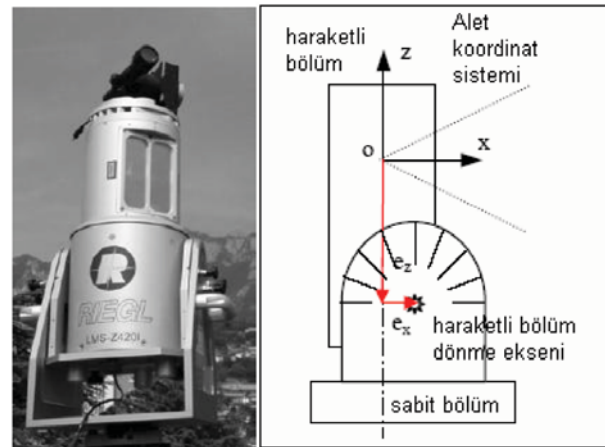
$R_{\kappa}$  : tarayıcı aletin yatay düzlemdeki  $\kappa$  dönmesine ait dönüklük matrisi,

$R_{\phi}$  : tarayıcı aletin düşey düzlemdeki  $\phi$  dönmesine ait dönüklük matrisi,

$e_x$  ve  $e_z$  : Tarayıcı aletin dönme eksenini ve koordinat başlangıç noktası arasındaki farklar,

$[t_x \ t_y \ t_z]^T$  : Tarayıcı aletin koordinat başlangıç noktasının arazi koordinat sistemine göre koordinatlarıdır.

Önerilen yöntem dürbün ile tarayıcının x koordinat eksenini yönünün bilinen bir noktaya yöneltilmesi şeklinde kullanılmaktadır. Aynı zamanda, koordinatları belirli işaretlerin lazer tarayıcı ile taranarak tarayıcı konumunun hesaplanması ve x eksenini yönlendirilmesi şeklinde de kullanılabilir (SCAIONI 2005).



Şekil 6: Dürbün monte edilmiş LMS-Z420 yersel lazer tarayıcı ve alet dönme eksenini geometrik yapısı.

#### 4. Sonuç ve Öneriler

3B ölçme verisi elde etmede yersel lazer tarama tekniği her geçen gün daha fazla alanda kullanılmaktadır. Yersel lazer tarayıcıların yetenekleri sürekli geliştirilmekte, yeni özellikler eklenmektedir. Lazer tarayıcıların aynı zamanda total station'lar gibi kullanım özelliklerine kavuşması gelecekte olabilecek olası yeniliklerindedir.

Lazer tarayıcı, nokta bulutlarının birleştirilmesinde de sürekli yeni teknikler ve yöntemler geliştirilmektedir. Burada anlatılan yöntemler, ölçme tekniği ve ölçülen objeye bağlı olarak kullanılabilir. İteratif en yakın nokta yöntemi 3B veri kümelerinin birleştirilmesinde en fazla kullanılan yöntemdir. Bilgisayarda yoğun hesaplama gerektirmesine rağmen uygulanması kolay ve oldukça hassas sonuçlar vermektedir. Yönelme parametrelerinin ilk yaklaşık değerlerinin uygun seçilmesi halinde iterasyon sayısı oldukça azalacaktır. EKK 3B görüntü eşleme yöntemi de iteratif olarak uygulanır ve oldukça hassas sonuçlar verir. İteratif en yakın nokta yönteminde olduğu gibi bu yöntemde de yönelme parametrelerinin yaklaşık değerlerinin önceden hesaplanması gerekir. Nokta bulutlarının jeodezik koordinat sistemine dönüştürülmesi gerekli ise bağımsız model yöntemi kullanılabilir. Yol güzergahı, tünel, maden ocakları gibi alanların ölçümünde, doğrudan jeodezik koordinatlara dayalı ölçme yapılabilir. Çünkü çok büyük alanların taramaları ardarda birleştirilirse sistematik hataların etkisi artacak ve model doğruluğu azalacaktır. Diğer taraftan her taramada en az 3 adet YKN ile jeodezik koordinatlara dönüşüm, hataların etkisini azaltmasına rağmen arazi çalışmalarını artıracaktır.

Tarihi ve kültürel varlıkların röleve ve modellenmesinde genellikle yerel koordinatlarla çalışıldığı için jeodezik koordinatlara gerek duyulmayabilir. Ancak yol, tünel, maden işletmesi gibi alanların jeodezik koordinatlara dayalı olarak taranması istenebilir. 3B model koordinatlarının jeodezik koordinat sisteminde olması halinde, farklı zamanlarda elde edilen farklı veri kümeleri herhangi bir işleme gerek kalmadan birleştirilebilecektir. Jeodezik koordinatlara göre olmayan birleştirmelerden elde edilen 3B modeller daha sonra 3B dönüşümle jeodezik koordinatlara dönüştürülebilir.

#### Kaynaklar

- AKCA D.: **A New Algorithm For 3D Surface Matching**, 20th ISPRS Congress, s.960-965, Istanbul/Turkey, 12-23 July 2004.
- AKCA D. ve GRUEN A.: **Fast Correspondence Search For 3D Surface Matching**, ISPRS WG III/3. III/4. V/3 Workshop "Laser scanning 2005", s.186-191, Enschede, The Netherlands, September 12-14, 2005.
- AL-MANASIR K. ve FRASER C.S.: **Automatic Registration of Terrestrial Laser Scanner Data via Imagery**, The ISPRS International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 36, Part 5 (2006), s.26-31.
- BESL P.J. ve MCKAY N.D.: **A Method for Registration of 3-D Shapes**, IEEE Trans. On Pat.Anal. and Mach. Intelligence, 14(2), February 1992, pp 239-256.

- BOEHLER W., BORDAS V.M., MARBS A.: **Investigating Laser Scanner Accuracy**, Proceedings of XIX<sup>th</sup> CIPA International Symposium, s.696-701, Antalya, Turkey, 30 Sep-4 Oct, 2003.
- GODIN G., LAURENDEAU D., BERGEVIN R.: **A Method For The Registration of Attributed Range Images**, International Conference on 3D Imaging and Modeling, s.179-186, Quebec, May 28-June 1, 2001.
- GRUEN A. ve AKCA D.: **Least Squares 3D Surface and Curve Matching**, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 59(2005), pp 151-174.
- ELKHRACHY I. ve NIEMEIER W.: **Optimization And Strength Aspects For Geo-Referencing Data With Terrestrial Laser Scanner Systems**, 3rd IAG/12<sup>th</sup> FIG Symposium, CD Room, Baden, 22-24 May 2006.
- FORKUO E.K. ve KING B.: **Automatic Fusion of Photogrammetric Imagery And Laser Scanner Point Clouds**, ISPRS XX<sup>th</sup> Congress, Commission 4, s.921-926, Istanbul, 12-23 July 2004.
- JOHANSSON M.: **Explorations into the behavior of three different high-resolution ground-based laser scanners in the built environment**, Proceedings of the CIPA WG6 Int. Workshop on scanning for cultural heritage recording, s.33-38, Antalya, 2002.
- JOHNSON A.E. ve KANG S.B.: **Registration And Integration of Textured 3-D Data**, Technical Report, Digital Equipment Corporation, Cambridge Research Lab., 40 pages, United states, Oct., 1996.
- LICHTI D.D., STEWART M.P., TSAKIRI M., SNOW A.J.: **Calibration and testing of a terrestrial laser scanner**, The ISPRS International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 12, Part B5/2 (2000), s. 485-492.
- LICHTI D.D. ve GORDON S.J.: **Error Propagation in Directly Georeferenced Terrestrial Laser Scanner Point Clouds for Cultural Heritage Recording**, Proceedings of FIG Working Week, s.on CD, Athens, Greece, 22-27 May 2004.
- SCAIONI M.: **Independent Model Triangulation of Terrestrial Laser Scanner Data**, The ISPRS International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 34, Part 5/W12 (2002), s. 308-313.
- SCAIONI M.: **Direct Georeferencing of TLS in Surveying of Complex Sites**, The ISPRS International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol.36, Part 5/W17, s.on CD, 2005.
- SHARP G.C., LEE S.W., WEHE D.K.: **ICP Registration Using Invariant Features**, IEEE Pattern Analysis and Machine Intelligence, 24(1) (January 2002), s. 90-102.
- TALAYA J., ALAMUS R., BOSCH E., SERA A., KORNUSS W., BARON A.: **Integration of Terrestrial Laser Scanner With GPS/IMU Orientation Sensors**, XX<sup>th</sup> ISPRS Congress, s.on CD, Istanbul, Turkey, 12-23 July 2004.
- WAGGOT S.M., CLEGG P., JONES R.R.: **Combining Terrestrial Laser Scanning, RTK GPS and 3D Visualisation: Application of Optical 3D Measurement in Geological Exploration**, Proceedings of the 7th Conference on 3-D Optical Measurement Techniques, s.on CD, Vienna, Austria, 3-5 Oct. 2005.
- ZHANG Z.Y.: **Iterative Point Matching for Registration of Free-Form Curves and Surfaces**, International Journal of Computer Vision, 13, 2, (October 1994), s. 119-152.
- ZWEYER A.: **HDS Products and Solutions**, Proceedings of ISPRS Lidar Workshop, s.on CD, Istanbul, 2006.
- URL1: FARO, <http://www.faro.com/content.aspx?ct=uk&content=pro&item=5&subitem=55>, Haziran 2007.
- URL2:LEICA, [http://www.leica-geosystems.com/hds/en/lgs\\_5570.htm](http://www.leica-geosystems.com/hds/en/lgs_5570.htm), Haziran 2007.
- URL3: OPTECH, <http://www.optech.ca>, Haziran 2007.
- URL4: RIEGL, [http://www.riegl.com/terrestrial\\_scanners/terrestrial\\_scanner\\_overview/\\_terr\\_scanner\\_menu\\_all.htm](http://www.riegl.com/terrestrial_scanners/terrestrial_scanner_overview/_terr_scanner_menu_all.htm), Haziran 2007.
- URL5: ZOLLER+FROHLICH, <http://www.zf-laser.com>, Haziran 2007.