

## **YERSEL LAZER TARAYICI NOKTA BULUTLARININ BİRLEŞTİRİLMESİ VE JEODEZİK KOORDİNAT SİSTEMİNE DÖNÜŞTÜRÜLMESİ: LİTERATÜR ARAŞTIRMASI**

Cihan ALTUNTAŞ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Selçuk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Konya

Türkiye

caltuntas@selcuk.edu.tr

### **Özet**

Yersel lazer tarayıcılarla üç boyutlu (3B) modelleme çalışmalarında, nokta bulutlarının birleştirilmesi en önemli işlem adımlarından birisidir. Bu amaçla bugüne kadar pek çok yöntem geliştirilmiştir, ancak lazer tarayıcı nokta bulutlarının birleştirilmesi hala önemli bir araştırma konusudur. Diğer yandan nokta bulutlarının otomatik birleştirilmesi de ciddi bir araştırma konusudur ve her türlü veri seti için uygulanabilecek standart bir yöntem bulunmamaktadır. Uygulanan yöntemler; otomasyon, doğruluk, hesaplama süresi, nokta yoğunluğu ve ölçü hatalarına duyarlılık bakımından farklılıklar göstermektedir. Ayrıca lazer tarama verilerinin başka konumsal verilerle entegrasyonu için jeodezik koordinat sistemi gibi ortak bir koordinat sistemine dönüştürülmesi gerekir. Ölçme tekniği ve lazer tarayıcı aletinin konfigürasyonuna bağlı olarak jeodezik koordinatlandırma yöntemleri değişiklik göstermektedir. Bu çalışmada lazer tarayıcı nokta bulutlarının birleştirilmesinde kullanılan yöntemler sınıflandırılmış ve belirli özellikleri vurgulanmıştır. Böylece nokta bulutlarının birleştirilmesi ve jeodezik koordinat sistemine dönüştürülmesi konusunda uygulayıcı ve araştırmacılara yol gösterici olunması amaçlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Yersel lazer tarama, Nokta bulutu, Birleştirme, Üç boyutlu dönüşüm, LIDAR, Jeodezik koordinatlandırma.

## **REGISTRATION AND GEOREFERENCING METHODS FOR POINT CLOUDS OF TERRESTRIAL LASER SCANNER: A REVIEW**

### **Abstract**

Point cloud registration is bottle neck on three-dimensional (3B) modelling by using terrestrial laser scanner. Many methods have been developed for the registration of point clouds so far. Nevertheless, it is still important research topic. Automatic registration of point clouds is also one of the important research topic on three-dimensional modelling. There are no standart methods for applying all type of data sets. The registration methods have different specifications in respect to automation, accuracy, computation time, point density and susceptiblity from irregular points. On the other hand, the point clouds have to be registered into extensive coordinate system like this geodetic system for the integration with the other spatial data. Georeferencing methods of point clouds change according to measurement methods and configuration of laser scanner instrument. In this study, point cloud registration methods have been classified and emphasized their main properties. Thus, it had to be given informataion for the applicants and researchers about point cloud registration and georeferencing.

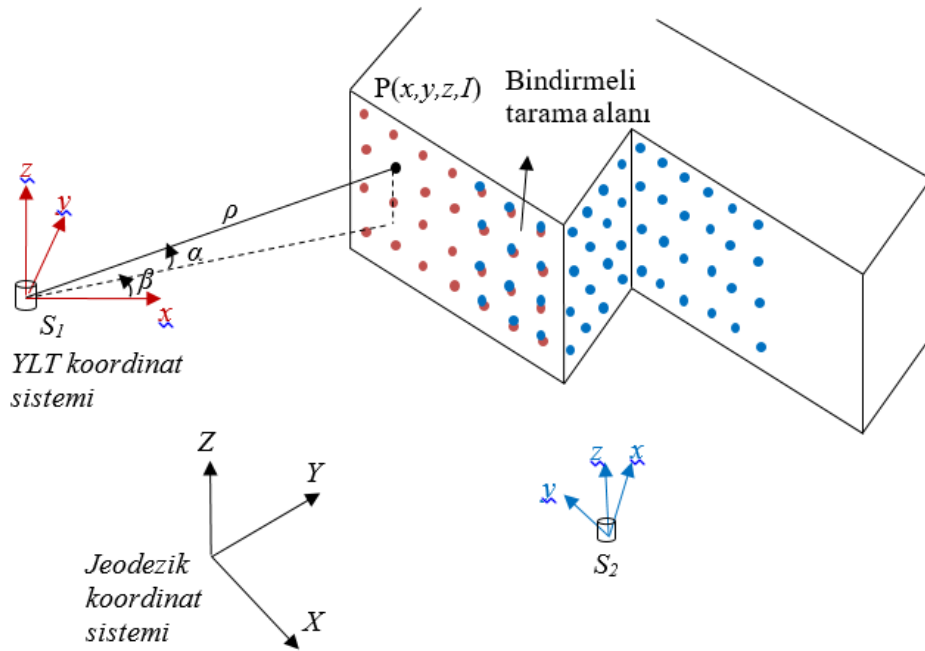
**Keywords:** Terrestrial laser scanning, Point cloud, Alignment, Three-dimensional registration, LIDAR, Georeferencing.

### **1. Giriş**

Hava ve yersel lazer tarama yöntemleri üç boyutlu (3B) konum bilgisi elde etmek için günümüzde yaygın olarak kullanılan tekniklerdir. Bu çalışma; tarihi eserlerin belgelenmesi [1], kentsel planlama [2], sanal gerçeklik uygulamaları [3] ve kaza yeri görüntüleme [4] gibi pek çok alanda kullanılan yersel lazer tarama yöntemi ile ilgilidir. Çok hızlı ve yoğun (kısa aralıklı) nokta konum bilgisi ölçülebilmesi sayesinde, lazer tarama yöntemi pek çok alanda cazip bir ölçü tekniği olarak öne çıkmaktadır.

Yersel lazer tarayıcı (YLT) ile bir cismin üç boyutlu modelinin oluşturulabilmesi için farklı istasyonlardan taramalar yapılır. Her tarama ölçüsü tarayıcı alet merkezli yerel bir koordinat sisteminde olduğundan [5] modeli oluşturabilmek için tüm taramaların ortak bir koordinat sisteminde birleştirilmesi gerekir. Nokta bulutlarının birleştirilmesi ile ilgili bu güne kadar pek çok çalışma yapılmıştır ancak her türlü veri setine uygulanabilecek standart bir yöntem yoktur. Bu nedenle nokta bulutlarının

birleştirilmesi hala önemli bir araştırma konusudur. Diğer yandan sorgulama, analizler ve görsel sunumlar için tüm konumsal bilgilerin ortak bir koordinat sistemine dönüştürülmesi gerekir. Ortak koordinat sistemi olarak genellikle jeodezik koordinat sistemi gibi yaygın koordinat sistemleri kullanılmaktadır. Bu durumda lazer tarama ölçülerinin jeodezik koordinat sistemine dönüştürülmesi gereklidir. Bu çalışmada, lazer tarayıcı ölçülerinin birleştirilmesi ve jeodezik koordinatlandırılmasında kullanılan yöntemler araştırılmış ve yapılan çalışmalar incelenmiştir.



Şekil 1. Yersel lazer tarayıcı ve jeodezik koordinat sistemleri ( $S_1$  ve  $S_2$  bindirmeli olarak yapılan lazer taramalarını göstermektedir.)

## 2. Yersel Lazer Tarama

Lazer tarayıcılar ölçme alanını yatay yada düşey yönde belirli aralıklarla tarar. Her tarama noktası için tarayıcıdan ölçülen noktaya olan eğik mesafe ( $\rho$ ) ve bu doğrultunun aletin yatay ve düşey eksenleri ile yaptığı açılar ( $\beta, \alpha$ ) ölçülür. Ayrıca lazer ışınının ölçülen noktadan olan yansıma şiddeti ( $I$ ) de ölçülerek kaydedilir. Diğer yandan lazer tarayıcılarda bütünleşik olarak bulunan kamera sayesinde ölçülen tarama noktaları için renk kaydı da yapılabilmektedir. Her nokta için kaydedilen bu kutupsal koordinatlardan tarayıcı alet merkezli dik koordinatlar ( $x, y, z$ ) hesaplanır (Şekil 1). Lazer tarayıcılarda alet ile ölçülen tarama noktası arasındaki mesafenin ölçümünde üçgenleme

(triangülasyon), uçuş zamanı (direct time-of-flight) yada faz farkı (indirect time-of-flight or phase-shift) yöntemleri kullanılmaktadır. Lazer tarayıcıların doğrulukları 100 m mesafede bir santimetre civarındadır [6]. Genel olarak faz farkı yöntemini kullanan lazer tarayıcıların doğruluğu doğrudan uçuş zamanlı ölçme tekniğini kullanan lazer tarayıcılara göre daha yüksektir [7]. Yaygın olarak kullanılan bazı yersel lazer tarayıcılara ait teknik bilgiler Tablo 1 de verilmiştir.

Tablo 1. Bazı lazer tarayıcı modelleri ve teknik özellikleri

| Firma                   | Model               | Min-Max. mesafe (m) | Nokta ölçme hızı (pts/sec) | Görüş açısı (V°xH°) | Mesafe doğruluğu (m) | 3D konum/ Açısal doğruluk (V and H) | Işın açıklığı       | Işın çapı          | Fonksiyonel özellik                | Mesafe ölçme tekniği |
|-------------------------|---------------------|---------------------|----------------------------|---------------------|----------------------|-------------------------------------|---------------------|--------------------|------------------------------------|----------------------|
| Leica (url-1)           | HDS8400             | 2.5-700m            | 8800                       | 80x360              | 20mm                 | /0.02°                              | 0.25mrad            | <10mm              | External GPS                       | Pulse                |
|                         | HDS8810             | 2.5-2000            | 8800                       | 80x360              | 8mm@200m             | /0.01°                              | 0.25mrad            | <8mm               | External GPS                       | Pulse                |
|                         | ScanStation C10     | 0.1-300             | 50000                      | 270x360             | 4mm                  | 6mm/V:12",H:12"                     | <1mm                | 7mm                | Bilgi yok                          | Pulse                |
|                         | ScanStation P30/P40 | 0.4-270             | 1000000                    | 270x360             | 1.2mm+10ppm          | 3mm@50m/V:8",H:8"                   | 0.23mrad            | <=3.5mm            | Backsighting                       | Pulse                |
| Optech (url-2)          | ILRIS-HD            | 3-1250              | Bilgi yok                  | 220x360             | 7mm@100m             | /80µrad                             | 0.008594° (150µrad) | 0.001146° (20µrad) | Backsighting, External INS and GPS | Pulse                |
|                         | ILRIS-HD-ER         | 3-1800              | Bilgi yok                  | 220x360             | 7mm@100m             | /80µrad                             | 0.008594° (150µrad) | 0.001146° (20µrad) | Backsighting, External INS and GPS | Pulse                |
|                         | ILRIS-LR            | 3-3000              | Bilgi yok                  | 220x360             | 7mm@100m             | /80µrad                             | 0.014324° (250µrad) | 0.001146° (20µrad) | Backsighting, External INS and GPS | Pulse                |
| RIEGL (url-3)           | RIEGL VZ-6000       | 5-6000              | 220000                     | 60x360              | 15mm@150m            | Bilgi yok                           | 0.12mrad            | 60mm@500m          | Backsighting, Geo-ref.             | Pulse                |
|                         | RIEGL VZ-2000       | 2.5-2050            | 396000                     | 100x360             | 8mm@150m             | Bilgi yok                           | 0.3mrad             | Bilgi yok          | Backsighting, Geo-ref.             | Pulse                |
|                         | RIEGL VZ-1000       | 2.5-1400            | 122000                     | 100x360             | 8mm@150m             | Bilgi yok                           | 0.3mrad             | Bilgi yok          | Backsighting, Geo-ref.             | Pulse                |
| Trimble (url-4)         | Trimble TX8         | 0.6-340             | 1000000                    | 317x360             | 2mm@120m             | /80µrad                             | 5.7mm@30m           | 34mm@100m          | External camera                    | Pulse                |
|                         | Trimble TX5         | 0.6-120             | 976000                     | 300x360             | 2mm@25m              | Bilgi yok                           | 0.19mrad(0.011°)    | 3mm@exit           | Barometer and Compass              | Pulse                |
|                         | FARO FOCUS3D x130   | 0.6-130             | 976000                     | 300x360             | 2mm@25m              | Bilgi yok                           | 0.19mrad(0.011°)    | 2.25mm@exit        | Barometer, Compass and GPS         | Pulse                |
| Topcon (url-5)          | GLS-1000            | 330                 | 3000                       | 70x360              | 4mm@150m             | /V:6",H:6"                          | 1mm@100m            | 6mm@40m            | Bilgi yok                          | Pulse                |
|                         | GLS-2000            | 1-350               | 120000                     | 270x360             | 3.5mm@150m           | /V:6",H:6"                          | Bilgi yok           | 4mm@20m            | Bilgi yok                          | Pulse                |
| Zoller+Fröhlich (url-6) | IMAGER 5006EX       | 0.4-79              | 508000                     | 310x360             | <1mm@50m             | /V:0.007°rms, H:0.007°rms           | 0.22mrad            | 3mm@1m             | Bilgi yok                          | Phase                |
|                         | IMAGER 5006h        | 0.4-79              | 1016027                    | 310x360             | <1mm@50m             | /V:0.0018°rms, H:0.0018°rms         | 0.22mrad            | 3mm@1m             | External GPS                       | Phase                |
|                         | IMAGER 5010C        | 0.3-187             | 1016000                    | 320x360             | <1mm                 | /V:0.007°rms, H:0.007°rms           | <0.3mrad            | 3.5mm@0.1m         | External GPS                       | Phase                |
|                         | PROFILER 9012       | 0.3-119             | 1016000                    | 360x360             | <1mm                 | /V:0.02°rms, H:0.02°rms             | <0.5mrad            | 1.9mm@0.1m         | External GPS                       | Phase                |
| MAPTEK (url-7)          | I-SITE 8820         | 2.5-2000            | 80kHz                      | 80x360              | Bilgi yok            | 6mm/V                               | Bilgi yok           | Bilgi yok          | Backsighting, Geo-ref.             | Pulse                |
| Stonex (url-8)          | X300L               | 2.5-180             | 40000                      | 90x360              | 6mm@50m              | Bilgi yok                           | 0.37mrad            | Bilgi yok          | External GPS                       | Pulse                |
|                         | X300                | 2.5-300             | 40000                      | 90x360              | 6mm@50m              | Bilgi yok                           | 0.37mrad            | Bilgi yok          | External GPS                       | Pulse                |
| TI Asahi (url-9)        | PENTAX_S-3180V      | 0.3-187             | 1016000                    | 320x360             | 2mm@100m             | /V:0.007°rms, H:0.007°rms           | <0.3mrad            | 3.5mm@0.1m         | External GPS, Odometer             | Phase                |
|                         | PENTAX_S-2100       | 0.3-119             | 1016000                    | 360x360             | 2mm@100m             | /0.02°rms                           | <0.5mrad            | 1.9mm@0.1m         | External GPS                       | Phase                |
| Clauss (url-10)         | Rodeon Smartscan    | 0.5-250             | 14400                      | 330x360             | 15mm@180m            | Bilgi yok                           | 5.0mrad             | Bilgi yok          | Bilgi yok                          | Pulse                |

### 3. Nokta Bulutlarının Birleştirilmesi

Bir cisim veya yüzeyin lazer tarama yöntemi ile 3B sayısal modelinin oluşturulabilmesi için tüm istasyonlardan yapılan taramaların (nokta bulutlarının) ortak (referans) bir koordinat sisteminde birleştirilmesi gerekir. Referans olarak herhangi bir koordinat sistemi veya taramalardan birisinin (genellikle ilk tarama) koordinat sistemi seçilebilir.

Lazer tarayıcı nokta bulutları 3B nokta koordinatlarından oluştuğu için, nokta bulutlarının birleştirilmesinde üç boyutlu dönüşüm parametreleri (üç öteleme, üç dönme) hesaplanmaktadır. Lazer tarama ölçüleri her istasyonda aynı ölçekli olduğundan bu çalışmanın konusu da nokta bulutlarının rigid dönüşümüdür. Rigid olmayan 3B dönüşümde ölçek parametresi de hesaba katılarak 7 parametre (ölçek, üç dönme, üç öteleme) hesaplanmaktadır [8,9]. Farklı 3B dönüşüm tekniklerinin rigid ve rigid olmayan uygulamaları ve bunların karşılaştırmalı sonuçları Tam ve diğ. [10] de verilmiştir.

Bir istasyondan ölçülen nokta bulutu yerel sistemde 3B nokta koordinatlarından oluşan bir veri setidir. Bu ölçü ile bindirmeli olarak yapılan ikinci ölçünün nokta bulutu da farklı bir yerel koordinat sistemindedir. Birinci nokta bulutu ( $S_1$ ) referans olarak alındığında ortak noktaların birinci ve ikinci nokta bulutu ( $S_2$ ) koordinatları arasındaki ilişki

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{S_1} = R_{\omega\phi\kappa} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{S_2} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}$$

bağıntısı ile ifade edilir. Burada (x,y,z) koordinatları aynı noktanın birinci ( $S_1$ ) ve ikinci ( $S_2$ ) nokta bulutu koordinatlarıdır.  $R_{\omega\phi\kappa}$  koordinat sistemleri arasındaki dönüklük açılarıyla oluşturulan 3x3 boyutlu dönme matrisi ve  $[t_x \ t_y \ t_z]^T$  ise koordinat sistemleri arasındaki öteleme vektördür. Bindirmeli olarak yapılan üçüncü ve diğer ölçülerde aynı şekilde ardışık olarak referans koordinat sistemine dönüştürülür ve 3B nokta bulutu modeli elde edilir. Bir model için yapılan tüm taramaların nokta bulutlarının bu şekilde ardışık birleştirilmesi birikimsel hatalara neden olmaktadır. Bunun için nokta bulutları referans sisteme dönüştürüldükten sonra global dönüşüm uygulanarak tüm nokta bulutlarının dönüşüm parametreleri aynı anda hesaplanmalıdır. Böylece ardışık birleştirmelerden kaynaklanan birikimsel dönüşüm hataları giderilmiş ve dönüşüm hatalarının etkisi azaltılarak modelin tamamına homojen olarak dağıtılmış olacaktır.

Ardışık lazer taramaları bindirmeli olarak (yaklaşık %30 oranında) yapılır ve birleştirme tekniklerinin neredeyse tamamında bu ortak tarama alanındaki noktalar kullanılır. YLT nokta bulutlarının birleştirilmesinde lazer tarama verileri  $(x,y,z,I)$  ile birlikte harici kamera görüntüsü ve kontrol noktası gibi ilave veri ve ölçüler de kullanılmaktadır.

Diğer taraftan nokta bulutlarının otomatik birleştirilmesi de ayrı bir araştırma konusudur. Otomatik birleştirme genel olarak iki aşamada uygulanmaktadır. İlk adımda yaklaşık yönlendirme uygulanmakta daha sonra bu yönlendirme sonucuna hassas yönlendirme uygulanmaktadır. Yaklaşık yönlendirme teknikleri [11] de karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Hassas birleştirme genellikle iteratif en yakın nokta (Iterative Closest Point), en küçük karelerle 3B görüntü eşleme (Least Square 3D Image Matching), karakteristik mesafe alanı (Signed Distance Fields) ve genetik algoritma teknikleri gibi yüksek hassasiyetli birleştirme yöntemleri ile uygulanmaktadır. İteratif en yakın nokta (İEYN) yöntemi en fazla tercih edilen yöntemdir ve nokta bulutlarının hassas birleştirilmesinde neredeyse standart bir yöntem haline gelmiştir. Diğer yandan otomatik birleştirmenin doğrudan uygulandığı yöntemlerde vardır. Ancak bu yöntemlerin doğruluğu biraz önce bahsedilen birleştirme teknikleri kadar iyi değildir. Bu nedenle nokta bulutlarının otomatik birleştirilmesi diğer yöntemlerle yapılmış olsa bile yüksek doğruluklu sonuç için genellikle elde edilen sonuca İEYN uygulanarak birleştirme doğruluğunun artırılması tercih edilmektedir. Nokta bulutlarını birleştirme yöntemleri uygulama tekniğine göre; etkileşimli ve otomatik, yada yönlendirme hassasiyetine göre; yaklaşık ve hassas birleştirmeler olarak sınıflandırma yapılabilir. Bu çalışmada, nokta bulutlarını birleştirme yöntemleri kullanılan verilere göre sınıflandırılmış ve

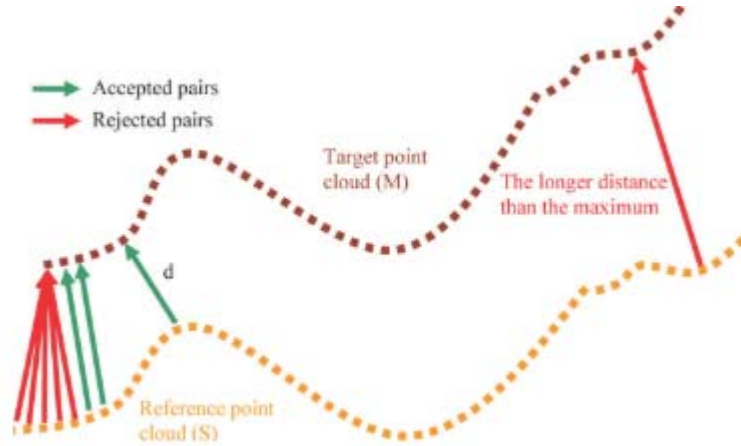
1. Lazer tarama verileriyle,
2. Kontrol noktalarıyla,
3. Lazer tarama verisi ve kamera görüntüleriyle

yapılan birleştirmeler olarak üç grupta toplanmıştır. Bu yöntemlerin her biri aşağıda alt başlıklar halinde detaylı olarak açıklanmıştır.

### *3.1 Lazer Tarayıcı Ölçüleriyle Nokta Bulutlarının Birleştirilmesi*

#### *3.1.1 İteratif En Yakın Nokta*

İteratif en yakın nokta (İEYN) yöntemi kolay uygulanabilen ve en çok kullanılan yöntemdir [12,13]. Bu yöntemin uygulanabilmesi için öncelikle eşlenik nokta bulutlarının yaklaşık yönlendirmelerinin yapılması gerekir. Eşlenik nokta bulutlarından birisi referans kabul edilerek diğer nokta bulutunun dönüşümü iteratif olarak yapılır. Referans nokta bulutundaki noktalar hedef nokta bulutundaki en yakın noktalarla eşleştirilerek her iterasyonda dönüşüm parametreleri hesaplanır (Şekil 2). Hesaplama süresini ve iterasyon sayı azaltmak için farklı teknikler geliştirilmiş ve farklı adlarla isimlendirilmiştir. Color İEYN [14], Levenberg Marquardt-İEYN [15], trimmed İEYN [16], SoftAssign EM-İEYN [17] ve Geometric Primitive İEYN with the RANSAC [18] bunlardan bazılarıdır. Eşlenik noktalar arasındaki fark belirlenen bir minimum değere ulaştığında yada iterasyon sayısı belirlenen maksimum değere ulaşınca kadar iterasyona devam edilir. Yaklaşık yönlendirmenin iyi yapılması durumunda genel olarak 15-20 iterasyonda sonuca ulaşmak mümkündür. Ölçülen tarama noktaları arasındaki mesafenin artmasının yani düşük nokta yoğunluğunun İEYN'nin birleştirme doğruluğuna etkisi çok düşüktür [19]. İEYN yöntemi hakkında daha fazla bilgi Pomerlau ve diğ. [20] ve Bellekens ve diğ. [21] de bulunabilir.



Şekil 2. İEYN yöntemi eşlenik nokta tespiti (Altuntas, 2014a)

### 3.1.2 En küçük Karelerle 3B Görüntü Eşleme

En küçük karelerle 3B görüntü eşleme (EKK3B), 2B görüntü eşleme [22] yönteminin 3B yüzeylerin eşleştirilmesinde uygulanmasıdır [23]. Yöntemin uygulanabilmesi için öncelikle nokta bulutlarının yaklaşık yönlendirmesi gerekir. Referans olarak alınan eşlenik görüntüden seçilen 3B referans penceresi iki yada daha fazla görüntüde aranarak eşlenik pencereler arasındaki Euclidean mesafeleri minimum olacak şekilde görüntüler birleştirilir. İki farklı nokta bulutunda aynı cisim noktasına karşılık

gelen yüzey elemanları  $f(xyz)$  referans penceresi ve  $g(xyz)$  araştırma penceresi olmak üzere problem; referans yüzeye en iyi uyan araştırma yüzeyinin bulunmasıdır.

Araştırma penceresi  $g(xyz)$  nin yeni konumu yaklaşık bir konumundan başlayarak tekrarlı olarak hesaplanır. Eşlenik görüntü pencereleri arasındaki ilişki 3B ve 7 parametrelili ortogonal dönüşüm bağıntısı ile ifade edilir [23-25]. Rijit dönüşümde ölçek faktörü 1 olarak alınır ve altı parametre hesaplanır.

En küçük karelerle 3B görüntü eşlemesi noktadan yüzeye olan mesafeler minimum olacak şekilde uygulandığında [26] noktadan noktaya olan birleştirmeden [27] dört kat daha yüksek doğruluk elde edilmiştir [28].

### 3.1.3 Karakteristik Mesafe Alanı

Karakteristik mesafe alanı metodunda, birleştirilecek nokta bulutunun yaklaşık yöneltmesi yapılmış olmalıdır. Daha sonra referans nokta kümesindeki her nokta için dönüştürülecek nokta kümesinde belirli mesafeden daha uzakta olmayan en yakın eşlenikleri aranır. Her eşlenik nokta konum bilgisi ve normal vektör ile ifade edilir. Bir  $S$  yüzeyindeki herhangi bir  $p$  noktasının karakteristik mesafesi (Signed Distance Field) o noktanın yüzeyden olan mesafesini ve yüzeyin hangi tarafında olduğunu ifade eder [29]. Bu sayede nokta bulutlarının bakış doğrultularının bilinmesi gerekmez. En yakın eşleşmeyi sağlayan noktalarla iteratif olarak dönüşüm uygulanır. Bu yöntem bütün nokta bulutlarının hesaplama esnasında var olmasını gerektirdiğinden anlık (real-time) uygulamalar için uygun değildir [29,30].

### 3.1.4 Genetik Algoritma

Nokta sayısının çok fazla ve görüntü alanı geometrisinin sürekli değişim gösterdiği durumlarda; nokta bulutlarının birleştirilmesinde genetik algoritmalar diğerlerine göre daha başarılı sonuçlar vermektedir. Nokta verilerinden düzlem [31] yada eğri yüzeyler belirli kurallar oluşturularak eşleştirilmekte ve dönüşüm parametreleri hesaplanmaktadır. Bu yöntemin esas problemi oldukça fazla hesaplama süresi gerektirmesidir. Genetik Algoritma (GA) ile yaklaşık [32] ve hassas [33] yöneltme uygulanabilmektedir. Ayrıca GA ile yaklaşık yöneltme olmaksızın doğrudan hassas yöneltme de yapılabilir [34,35]. Elde edilen doğruluk diğer hassas birleştirme yöntemleri ile aynı seviyededir [33]. Diğer yöntemlerde yüksek hassasiyetli birleştirme için bindirme oranının %30 dan fazla olması istenir. Ancak GA ile bindirme oranı zayıf nokta bulutlarının birleştirilmesi yüksek hassasiyetli olarak yapılabilmektedir [34,36].



Diğer yandan GA birleştirme yöntemleri, ölçü hatalarından dolayı nokta bulutları arasındaki uyumsuzluklardan etkilenmez [37]. GA ile yaklaşık yöneltme uygulanması durumunda hassas yöneltme İEYN yöntemi ile uygulanmaktadır [38].

### 3.1.5 3B Yerel Özellik Tanımlayıcılar

Bu yöntem genel olarak 2B yerel özellik tanımlayıcıların 3B nokta bulutuna uygulanmasıdır. SIFT, Harris yada geliştirilen başka operatörlerle yerel özellik noktaları tanımlanmaktadır [39,40]. Belirli büyüklükte bir 3B grid prizması (voxel) nokta bulutunda gezdirilerek yerel minimum ve maksimum noktalar tespit edildikten sonra üç boyutlu uzayda özellik (detay) tanımlayıcı noktalar belirlenmektedir. Yerel özellik noktalarının tanımlanmasında nokta koordinatları ile birlikte renk ve doku bilgisi de kullanılabilir [41,42]. Renk ve doku bilgisi içeren özellik tanımlayıcılarda hatalı eşleşme oranı daha düşüktür. Yerel özellik noktalarının tanımlanmasında yüzey normali ve eğriliği geometrik özellikleri temsil etmektedir [43]. Karşılıklı görüntülerden yerel özellik noktalarının eşleştirilmesinde noktalar arasındaki mesafelerin oranı (nearest neighbour distance ratio-NNDR) kullanılmaktadır. Hatalı noktalar RANSAC (Random Sample Consensus; rastgele örneklemeli uyuşum testi) yöntemi ile ayıklanarak maksimum sayıda nokta ile dönüşüm parametrelerinin hesaplanması sağlanmaktadır [41].

### 3.1.6 Yansıma ve Mesafe Görüntüleri ile Birleştirme

Lazer tarayıcı nokta koordinatları  $(x,y,z)$  ve yansıma ( $I$ ) değerleri kullanılarak 2B yansıma görüntüleri oluşturulmaktadır. [44-47]. Yansıma görüntüsü oluşturulduktan sonra SIFT, SURF, gibi 2B yerel özellik tanımlama operatörleri ile detay noktaları belirlenmekte ve eşleştirilmektedir. Yansıma görüntüsündeki her detay noktasının koordinatları bilindiği için eşlenik detay noktalarının koordinatları ile dönüşüm parametreleri hesaplanmaktadır [44,48-50]. Detay noktalarından hatalı eşlenenler 3B uzayda Euclidean mesafeleri karşılaştırılarak yada RANSAC yöntemi ile tespit edilmektedir. Yansıma görüntüsü oluşturulmasına benzer şekilde mesafe değerleri ile de gri tonlu görüntüler oluşturulabilmektedir. Gerek yansıma gerek mesafe görüntüsünün kullanılması durumunda eşlenik detay noktaları (key points) arasındaki farklar minimum olacak şekilde iteratif olarak dönüşüm uygulanmaktadır [51,52]. Yansıma görüntüleri ile nokta bulutlarının otomatik birleştirilmesi Altuntas [47] da verilmiştir.

### *3.1.7 Yüzey Elemanları Analizi ile Birleştirme*

Bu yöntemde öncelikle mesh görüntü oluşturulur. Mesh görüntü oluşturulduktan sonra her tarama noktasının normal vektörü hesaplanır. Komşu iki noktanın normal vektörleri arasındaki fark bu vektörlerin sınıflandırılmasında kullanılan bir ölçüttür. En küçük kareler yöntemi ile aynı düzlem içine giren yada aynı karakterdeki eğri noktaları temsil eden yüzey normalleri hesaplanır. Yüzey normalleri ile nokta bulutu belirli karakteristik özellikleri temsil eden alt birimlere ayrılmış olur ve bunların benzerliği kullanılarak nokta bulutları eşleştirilir [38,53-55]. Yüzey normali ile temsil edilen her şekil elemanı (düzlem yada eğri) bir kovaryans matrisi ile temsil edilir. Bu kovaryans matrisinin tekil değerlerine ayrışımı (Singular Value Decomposition) ile yüzey normalinin özdeğer ve öz vektörü hesaplanır [56]. Dold [57] ve Makadia ve diğ. [58] yüzey normallerini hesaplamada Gauss küresini kullanmışlardır. PCA (Principal Component Analysis; Temel Bileşen Analizi) yönteminin düzlem [59-63] ve eğri [38] yüzey elemanları için farklı uygulamaları bulunmaktadır. PCA yöntemi; nokta bulutu içerisinde, noktalar arası ilişkilerin ve temel geometrik özelliklerin matematiksel olarak ifade edilmesidir. Nokta bulutundan silindir, düzlem ve küre şeklindeki detayların tespiti ve bunların RANSAC ile otomatik eşleştirilmesi yapılabilmektedir [64].

Düzlem yüzeylerin benzerliği karşılaştırılırken sadece alanları değil kenar uzunlukları da dikkate alınarak eşleşme durumları denetlenebilmektedir [65]. Bu yöntemin önemli bir özelliği, bindirme oranı çok az ve belirgin detay içermeyen eğri yüzeylere ait ölçülerin birleştirilmesinde başarılı bir şekilde uygulanabilmesidir [66]. Pulli [67] de mesh yüzey oluşturulduktan sonra noktaların eşleniklerinin bulunmasında yüzey normallerinden yararlanılmış ve yüzey normalleri arasındaki fark 45 dereceden büyük ise eşleştirme yapılmamıştır.

Yersel mobil lazer tarama verilerinin birleştirilmesinde düzlem yüzeylerin kullanıldığı robust istatistiksel bir yaklaşım Nurunnabi ve diğ. [68] tarafından önerilmiştir. Önerilen yöntem ile en küçük karelerle görüntü eşleme, klasik yüzey elemanları analizi ve RANSAC yöntemlerine göre daha hızlı ve yüksek doğruluklu sonuçlar elde edilmiştir.

### *3.1.8 Optimizasyon Yöntemleri*

Literatürde, yaklaşık yada hassas birleştirme yapılabilen optimizasyon yöntemleri önerilmektedir. Breuel [69] ve Olsson ve diğ. [70] tarafından önerilen deterministik

yöntemle maksimum sayıda noktanın yüksek hassasiyetle global dönüşümü gerçekleştirilebilmektedir. Ancak hesaplama süresi çok uzundur. Diğer bir deterministik yaklaşım Lipschitz optimizasyon teorisine dayalı olarak Li ve Hartley [71] tarafından önerilmiştir.

Bonarrigo ve Signoroni [72] tarafından önerilen optimizasyon yönteminde özellikle karmaşık detaylı alanlarda oluşan boşlukların birleştirme doğruluğuna olumsuz etkisi azaltılmaktadır. Eşlenik noktaların bulunmasında İEYN de kullanılan yöntemler modifiye edilerek optimizasyon tekniği ile eşlenik noktalar belirlenmektedir. Hesaplama süresi de oldukça kısadır. Eşlenik birleştirmede nokta bulutlarındaki hatalı noktaların etkisini azaltan optimizasyon tekniği Papazov ve Burschka [73] de verilmiştir. Birikimsel hataların global dönüşüme etkisini azaltmak için ise farklı şekillerde uygulanan optimizasyon teknikleri kullanılmaktadır [73-75]. Çoklu nokta bulutlarının tam otomatik birleştirilmesi için Huber ve Heber [76] de önerilen optimizasyon tekniğinde öncelikle ölçüler birbirleri ile bindirmeli olup olmadıklarına göre sınıflandırılmış ve daha sonra eşlenik birleştirme uygulanmıştır. Eşlenik ve global birleştirmeler noktadan yüzeye olan mesafeler minimum olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

Yaklaşık yöneltme probleminin çözümü için Expectation-Maximization [77], Levenberg-Marquardt ve Newton optimizasyon yöntemleri [78,79] kullanılmıştır. Kirshnan ve diğ. [80] ve Krishnan ve diğ. [81] de önerilen optimizasyon yöntemi, nokta bulutunda aykırı noktalar bulunmadığı durumlarda iyi bir yaklaşık yöneltme sağlamaktadır.

### *3.1.9 RANSAC Yöntemi*

RANSAC yöntemi en az üç noktanın eşleştirilmesi ile karşılıklı nokta bulutları arasındaki ilişkinin kurulmasına dayanır. Bunun için önce referans nokta bulutunda rastgele üç nokta seçilir. Bu noktalardan ilki diğer nokta bulutundan bir nokta ile eşleştirilir. Bu durumda ikinci noktanın hedef nokta bulutundaki eşleniği bu noktalar arasındaki mesafe kadar uzakta bir noktada olacaktır. Bu tanıma uyan ikinci nokta bulunduktan sonra üçüncü noktanın diğer noktalarla olan ilişkisine benzer ilişkiyi sağlayacak şekilde diğer nokta bulutunda üçüncü noktanın eşleniği aranır [82]. Bu eşleşmede sağlandıktan sonra üç nokta ile dönüşüm parametreleri hesaplanır ve uygulanır. En fazla nokta ile bu eşleşmenin sağlandığı durumda en iyi çözüm elde

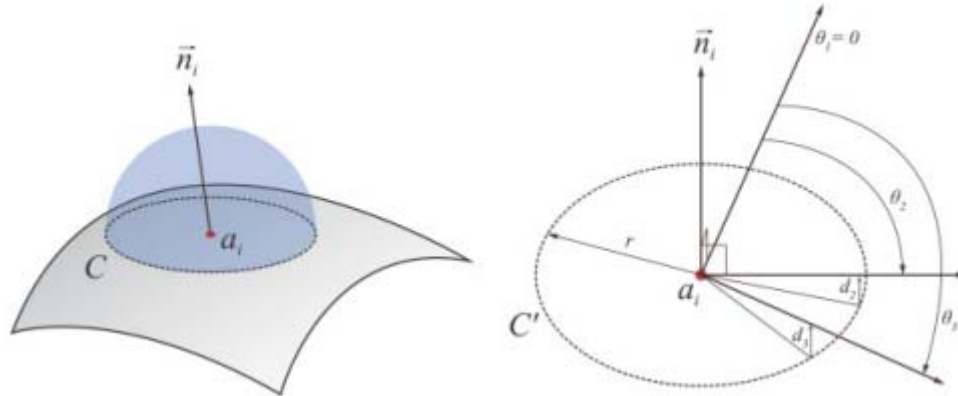
edilmiş olur. Yöntemin uygulanması yoğun hesaplama gerektirdiğinden küçük objeler için daha uygun görülmektedir. Özellikle eşlenik noktaların aranması için çok fazla zaman gerekmektedir. Hesaplama süresini azaltmak için farklı yöntemler önerilmektedir [83]. Ancak yinede hız gerektiren işler için uygun bir birleştirme yöntemi değildir. Diğer yandan eşlenik veri setlerinde noktalar arasındaki mesafelerin uyumlu olmaması sonuç doğruluğunu azaltmaktadır. Diğer yandan veri seti içindeki hatalı noktalar sonuç doğruluğunu etkilememektedir [84].

### 3.1.10 Alansal Mesafe Vektörleri

Bu yöntemde her iki nokta bulutunun mesh görüntüsü oluşturulduktan sonra belirli büyüklükte bir voxel  $v(i,j,k)$  gezdirilerek bunun içerisine düşen noktaların Euclidean mesafeleri hesaplanmaktadır. Mesh kelimesi üçgen yada dörtgen şekilli kafes ağ anlamına gelmektedir. Makale içerisinde mesh ifadesi üçgen kafes anlamında kullanılacaktır. Burada  $0 \leq i \leq \max_x$ ,  $0 \leq j \leq \max_y$ ,  $0 \leq k \leq \max_z$  dir.  $\max_x$ ,  $\max_y$  ve  $\max_z$  eksenler boyunca oluşturulacak kutu sayısıdır. Eksenler boyunca oluşturulan her kutu en az bir üçgen (mesh) elemanına karşılık gelir. Daha sonra her kutu konumu için mesh yüzey elemanlarından olan en kısa mesafeler hesaplanır  $d(i,j,k)$  şeklinde indekslenir. Burada; yüzey elemanlarını içeren kutular için en kısa mesafe sıfırdır ve en kısa mesafedeki mesh elemanı (yüzey voxeli) kendisidir.  $A$  konumundaki kutu elemanından  $B$  mesh elemanına doğru bir hat boyuca hesaplanan mesafeler  $l=d_1,d_2,d_3,\dots$  şeklindedir.  $n$  ile gösterilen AB vektörünün dönüklüğü  $l$  vektörleri ile ilişkilidir.  $v(i,j,k)$  kutusu için mesafe vektörü  $w(i,j,k)=(n(i,j,k),l(i,j,k))$  ile ifade edilir. Bir voxel de en kısa mesafe değerinde birden fazla mesh yüzey olabilir. Bunlar dönüşüm aşamasında elemine edilirler. Bu şekilde iki nokta bulutu setindeki  $v_s$  ve  $v_m$  voxelleri için mesafe vektörleri  $w_s=(n_s,l_s)$  ve  $w_m=(n_m,l_m)$  olsun. Karşılıklı veri setlerinden  $i$  konumundaki  $l_m$  ve  $j$  konumundaki  $l_s$  vektörleri arasındaki fark belirlenen bir eşik değerinden küçük ise iki voxel ( $v_s,v_m$ ) in benzeştiği kabul edilir ve eşleştirilir. Bu şekilde eşlenen voxel ile dönüşüm parametreleri iteratif olarak hesaplanır. Buradan da anlaşılacağı gibi yöntemin uygulanabilmesi, nokta bulutlarının yaklaşık yönelmesini gerektirmemektedir. Diğer yandan iki nokta bulutu aynı yüzeye ait olmasalar bile bunlar arasında bir eşleştirme mümkün olmaktadır [85].

### 3.1.11 Geometrik Yüzey Modeli ve Yüzey Eğriliği Eşleştirmesi

Yöntemin esası Feldmar ve Ayache [86] tarafından tanımlanmıştır. Her yüzey noktası karakteristik bir eğri  $(k_1, k_2)$  ile temsil edilir [87,88]. Bu yöntemde herhangi bir detay noktası; karakteristik eğri, normal vektör  $(n)$  ve karakteristik eğriye karşılık gelen öz vektörlerle  $(e_1, e_2)$  tanımlanır (Şekil 3).  $S_1$  ve  $S_2$  bindirmeli iki nokta kümesi olsun. Yöntem şu şekilde uygulanır. Herhangi bir  $S_1$  nokta kümesinin  $M$  noktasını içeren yüzey noktaları ile yüzey eğriliği hesaplanır. Daha sonra  $M$  noktasına yakın yüzey noktalarından olan herhangi bir  $N$  noktası için için yüzey eğriliği hesaplanır.  $M$  için yüzey elemanı  $R_1(M, e_{11}, e_{21}, n_1)$ ,  $N$  için yüzey elemanı  $R_2(N, e_{12}, e_{22}, n_2)$  olmak üzere  $D$  ve  $D'$  yer değiştirmeleri hesaplanır. Burada  $D$ ,  $R_1$  den  $R_2$  ye,  $D'$  ise  $R_2$  den  $R_2'(N, -e_{12}, -e_{22}, n_2)$  ye olan dönüşümü ifade eder. Bunlar arasında  $R_1$  den  $R_2$  ye dönüşüm parametresi hesaplanır. Normal vektörün doğrultusu bilinmediği için her iki dönüşüm de yapılmalıdır. Daha sonra  $S_1$  ve  $S_2$  nokta kümesinin alt nokta kümeleri arasında belirlenen eşik değerindeki Euclidean mesafesini sağlayan noktalar ile dönüşüm parametreleri iteratif olarak hesaplanır [86]. Bu yöntemde dönüşüm eşlenik noktalar ile yapıldığı için hatalı noktalar ve taranmayan alanlar sonucu olumsuz etkilemektedir.



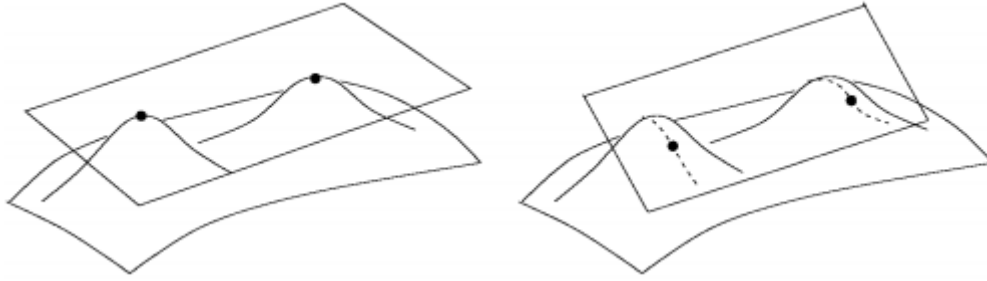
Şekil 3. Bir  $a_i$  noktasındaki detay karakteristiğinin tanımlanması.  $a_i$  noktasındaki  $C$  eğriliğindeki yüzeyin merkezi  $a_i$  olan küre ile kesişimi (solda).  $C$  eğriliğindeki yüzeyden  $C'$  eğriliğindeki yüzeye dönüştürülen noktaların mesafe ve açıları (sağda). (Şekil Diez ve diğ. [11] den alınmıştır)

Diğer yandan, nokta bulutunun tüm noktalarını temsil eden polinom yüzeyleri oluşturularak yüzeyler arasındaki mesafeler minimum olacak şekilde yüzeyler birleştirilebilir [89,90].

### 3.1.12 Çizgi Esaslı Birleştirme

Öncelikle, tanımlı bir tangent düzlemine aynı anda teğet noktaların (bitangent curves) birleşmesiyle eğri çiftleri (crest lines) oluşturulur (Şekil 4). Bu şekilde diğer

nokta bulutunda da eğri çiftleri oluşturulur. İki nokta bulutunda bulunan bu eğri çiftler, birbirleriyle benzerliği dikkate alınarak eşleştirilir. Yöntemin uygulamasını kolaylaştırmak için eğriler eşit boylarda olacak şekilde bölünür. Eğrilerin eşleşmesiyle dönüşüm parametreleri hesaplanır. Bütün noktalar bu dönüşüm parametreleri ile dönüştürülür ve noktalardaki farklarla dönüşüm hatası hesaplanır. Minimum dönüşüm hatası sağlayan eğri eşleşmesi doğru kabul edilerek nokta bulutlarının birleştirilmesi yapılır. Bu yöntem ile nokta bulutlarının yaklaşık yöneltmesi yüksek doğrulukla yapılabilmektedir. Hesaplama süresi çok uzun değildir. Ölçme alanının şeklini genel olarak temsil eden eğrilerin sınıflandırılması ve bunların eşleştirilmesi ile de nokta bulutları birleştirilebilmektedir [91,92].



Şekil 4. Üç boyutlu uzayda aynı düzleme teğet (bitangent) noktalar. Bu tür yüzeyler tüm alanda oluşturulabilir ve ardışık noktalar bitangent eğrileri oluşturur (Şekil Wyngaerd ve Gool [92])

Cisim geometrisine ait düz hatlarla da eşleştirme yapılabilmektedir. Özellikle bina cephelerine ait taramalarda, farklı seviyedeki yüzeyler arasındaki düz hatlar, düzlem tanımına uyan nokta kümelerinin sınıflandırılması ile belirlenebilmektedir [93,94].

### 3.2 Kontrol Noktaları ile Birleştirme

Bu yöntemle nokta bulutlarının birleştirilmesi taranan cisim üzerinde işaretlenen kontrol noktaları ile yapılmaktadır. Kontrol noktalarını işaretlemek için düzlem (kağıt vb üzerine basılı) yada küre [95] şeklinde hedef işaretleri kullanılır. Kontrol noktalarının her nokta bulutundaki local koordinatları etkileşimli olarak okunabilir. Ancak böyle bir durumda nokta sıklığından dolayı kontrol noktası işaretinin tam merkez koordinatı okunamaz. Bunun için kontrol noktasının koordinatı görüntü işleme tekniği ile elde edilmelidir [96]. Dolayısıyla bu şekilde elde edilecek koordinat herhangi bir tarama noktasına karşılık gelmeyebilir. Taramalardan birisi referans olarak seçilmesi

durumunda ardışık taramalar ortak örtü alanında tesis edilen en az üç adet kontrol noktası ile referans koordinat sistemine dönüştürülür. Diğer yandan bu kontrol noktalarından bazıları jeodezik koordinat sisteminde koordinatlandırılırsa bağımsız model dengelemesi ile hem nokta bulutları birleştirilir hemde jeodezik koordinat sistemine dönüşüm yapılmış olur [95]. Herhangi bir işaret tesis etmeden ölçme alanındaki belirgin detaylar da kontrol noktası olarak kullanılabilir. Ancak bu durumda her nokta bulutunda aynı noktanın tanımlanması zor olmakta dolayısıyla doğruluk azalmaktadır.

### *3.3 Lazer Tarama ve Kamera Görüntüleri ile Nokta Bulutlarının Birleştirilmesi*

Lazer tarayıcı ile ölçme alanının  $xyz$  konum ve  $I$  yansıma değerleri ölçülürken tarayıcıya entegre kamera ile ölçme alanının fotoğrafı da kaydedilmektedir. Kamera görüntüleri nokta bulutlarının ortak bir koordinat sistemine dönüştürülerek birleştirilmesinde kullanılabilir [97,98]. Al-Manasir ve Fraser [98] lazer tarama istasyonlarından ve tarayıcıdan bağımsız olarak aynı kamera ile alınan görüntüleri birlikte değerlendirmiş ve nokta bulutlarını birleştirmiştir. Başka bir çalışmada, yalnızca lazer tarama istasyonlarında alınan görüntülerin karşılıklı yöneltmesi ile dönüşüm parametreleri hesaplamıştır. Sonuçlar İEYN ve kontrol noktaları ile yapılan birleştirme ile karşılaştırılmış ve benzer hassasiyette sonuçlar elde edilmiştir. Diğer yandan istasyonlardan yalnızca birine ait kamera görüntüsü ile de nokta bulutları birleştirilmiştir [99].

Özellikle belirgin geometrik özellik göstermeyen alanlara ait taramaların birleştirilmesinde eşlenik nokta tespiti için doku bilgisine de ihtiyaç duyulmaktadır [100,101]. Lazer tarayıcılarda bütünleşik olarak bulunan yada sonradan takılan kamera görüntüleri tarama alanına yerleştirilen hedef işaretlerinin otomatik seçiminde kullanılabilir [102]. Ayrıca kamera ve tarayıcı eksenleri arasındaki parametreler bilindiği için nokta bulutundan çıkarılan detayların eşleşme doğruluğunun artırılmasında da kamera görüntüleri kullanılabilir [103]. Diğer yandan referans nokta bulutu ile ortak alanı bulunmayan komşu nokta bulutunun referans sisteme dönüşümü tarayıcıdan bağımsız kamera ile alınan fotoğraflarla yapılabilir [104].

Tablo 2. Nokta bulutu birleştirme yöntemleri (Tabloda referans çalışmalarda makalenin yayınlandığı yılın son iki rakamı esas alınmıştır.)

| Yöntem                     | Referans Çalışma                         | Uygulama   |  | Hesaplama |          | Otomasyon | Birleştirme sonucu |          | Başlangıç yöneltmesi |       |   |
|----------------------------|--|--|--|-----------|----------|-----------|--------------------|----------|----------------------|-------|---|
|                            |  | İkili  | Çoklu  | Doğrusal  | Tekrarlı |           | Hassas             | Yaklaşık | Evet                 | Hayır |   |
| Lazer tarama verileri      | İEYN                                     | Besl92,Chen92,Chetverikov05,Fitzgibbon03               | √  |           |          | √         | √                  |          | √                    |       |   |
|                            | EKK3B                                    | Akca07,Grant12,Gruen05                                 | √  |           |          | √         | √                  |          | √                    |       |   |
|                            | Karakteristik mesafe alanı               | Masuda01,Masuda02                                      |  | √         |          | √         | √                  |          | √                    |       |   |
|                            | Genetik Algoritma                        | Silva07  |  | √         |          | √         | √                  |          |                      |       | √ |
|                            |  | Chow04   | √  |           |          | √         | √                  |          |                      |       | √ |
|                            |  | Liu06  |  | √         |          | √         | √                  |          |                      |       | √ |
|                            |  | Lomonosov06  | √  |           |          | √         | √                  |          | √                    |       | √ |
|                            | 3D yerel özellik tanımlayıcı             | Tarel99  | √  |           |          | √         |                    | √        |                      | √     |   |
|                            |  | Cirujeda15, He13                                       |  | √         |          | √         | √                  |          | √                    |       | √ |
|                            | Huang12,Mützel15,Theiler14               | Huang12,Mützel15,Theiler14                             | √  |           |          | √         | √                  | √        |                      | √     |   |
|                            |  | Yansıma ve mesafe görüntüleri                          | Barnea08,Smith08,Weinmann11,Han13,Altuntas14 | √         |          |           | √                  | √        |                      | √     | √ |
|                            | Yüzey elemanları analizi                 | Liao14,Mian06,Nurunnabi14,Yamany99, Makadia06, Pulli99 | √  |           |          | √         | √                  |          | √                    |       | √ |
|                            |  | Chung98, Liu05,Schnabel07                              |  | √         |          | √         | √                  |          | √                    |       | √ |
|                            |  | Friedman12,Theiler12,Zhang12                           | √  |           | √        |           | √                  |          | √                    |       | √ |
|                            |  | Dold05   |  | √         |          | √         |                    |          | √                    |       | √ |
|                            | Optimizasyon                             | Bonarrigo14,Boughorbel10, Lee05                        |  | √         |          | √         | √                  | √        |                      | √     |   |
|                            |  | Li07,Mateo14   |  | √         |          | √         | √                  | √        |                      |       | √ |
|                            |  | Papazov11  | √  |           |          | √         | √                  | √        |                      |       | √ |
|                            |  | Krishnan07   |  | √         |          | √         | √                  |          | √                    |       | √ |
|                            | RANSAC                                   | Chen99   | √  |           |          | √         | √                  |          | √                    | √     |   |
|                            | Alansal mesafe                           | Xiao07   | √  |           |          | √         | √                  |          | √                    | √     |   |
|                            | Geometrik yüzey modeli ve yüzey eğriliği | Feldmar94  | √  |           |          | √         | √                  | √        |                      |       | √ |
|                            |  | Tarel98  | √  |           |          | √         | √                  |          | √                    |       | √ |
| Robertson02                |  | √  |  |           | √        | √         | √                  |          |                      | √     |   |
| Reyes07                    |  | √  |  | √         |          | √         | √                  |          |                      | √     |   |
| Çizgi esaslı birleştirme   | Stamos03,Yang14,Wyngaerd02               | √  |  |           | √        | √         |                    | √        |                      | √     |   |
|                            | Chao05                                   |  | √  |           | √        |           |                    | √        |                      | √     |   |
| Kontrol noktaları          | Akca03                                   |  | √  | √         |          | √         | √                  |          |                      | √     |   |
|                            | Scaioni03                                |  | √  | √         |          |           | √                  |          |                      | √     |   |
| L.Tarama ve Kamera Görünt. | Dold06                                   | √  |  |           | √        | √         |                    | √        |                      | √     |   |
|                            | Al-Manasir06                             | √  |  | √         |          | √         |                    | √        |                      | √     |   |
|                            | Barnea07, Wyngaerd03                     |  | √  |           | √        | √         |                    | √        |                      | √     |   |



#### **4. Jeodezik Koordinatlandırma**

YLT verileri ile oluşturulan modelin diğer konumsal verilerle ilişkilendirilebilmesi için jeodezik koordinat sistemine dönüştürülmesi gerekir. Bu sayede, oluşturulan 3B modelin diğer konumsal bilgilerle ilişkisi kurulabilir ve coğrafi bilgi sistemlerinde (kent bilgi sistemi ve Google Earth gibi) konumsal sorgulama yapılabilir.

Jeodezik koordinat sistemi ulusal yada küresel (WGS84) ölçekli olabilir. Ölçülerin jeodezik koordinat sistemine dönüştürülmesi, jeodezik koordinatlandırma (georeferencing) olarak adlandırılmaktadır.

Lazer tarayıcı ölçülerinin jeodezik koordinat sistemine dönüştürülmesinde uygulanan yöntemler;

- Dolaylı jeodezik koordinatlandırma,
- Doğrudan jeodezik koordinatlandırma,
- Veri işlemeye dayalı jeodezik koordinatlandırma

olarak üçe ayrılır [105,106]. Jeodezik koordinatlandırmada hangi yöntemin kullanılacağı lazer tarayıcı aletinin konfigürasyonuna, ölçme sahasının büyüklüğüne ve istenilen ölçü doğruluğuna göre belirlenir. Bu yöntemler aşağıda alt başlıklar halinde incelenmiştir.

##### *4.1 Dolaylı Jeodezik Koordinatlandırma*

Dolaylı jeodezik koordinatlandırma, lazer tarayıcı nokta bulutu ve jeodezik sistemde koordinatları bilinen kontrol noktaları ile yapılmaktadır. En az üç kontrol noktası kullanılarak koordinat sistemleri arasındaki dönüşüm parametreleri hesaplanır [95,107]. Kontrol noktaları lazer tarama işleminden önce özel işareti (kağıt hedefler yada küre ve silindir hedefler) ile ölçme alanında işaretlenmiş olabileceği gibi model üzerinde seçilebilen belirgin detay noktaları da kontrol noktası olarak kullanılabilir. Bu yöntemde kontrol noktalarının jeodezik koordinatlarının yersel yöntemlerle ölçülmesi gerekir. Dolayısıyla kontrol noktalarının işaretlenmesi ve koordinatlarının ölçülmesi ilave zaman gerektirir ve maliyeti artırır. Kontrol noktalarının jeodezik koordinatları total station yada GNSS alıcıları ile ölçülebilir. Diğer yandan, bu yöntemde jeodezik koordinat sistemine dönüşümün yüksek hassasiyette yapılabilmesi için üçten fazla kontrol noktası kullanılmalıdır.

##### *4.2 Doğrudan Jeodezik Koordinatlandırma*

Doğrudan jeodezik koordinatlı ölçme lazer tarayıcının teknik yeteneğine ve ölçme konfigürasyonuna bağlı olarak dört farklı şekilde uygulanmaktadır. Birinci yöntem; tarayıcının bir nokta üzerine kurulması ve lazer tarayıcı üzerine takılan bir teodolit ile tarayıcının koordinat ekseninin jeodezik koordinat sistemine göre yönlendirilmesi şeklindedir. Böylece lazer tarayıcı, jeodezik koordinatı bilinen kontrol noktası üzerine kurulabilmekte ve diğer bir kontrol noktasına yönlendirilebilmektedir [106,108,109].

İkinci yöntem; tarayıcı üzerine monte edilen GNSS alıcısı ile tarama istasyonunun jeodezik koordinatının ölçülmesi, tarayıcının dönüklüğünün ise tarama alanına yerleştirilen ikinci bir GNSS alıcısı [110-112] yada tarayıcıya monte edilen pusula [104,113,114] ile belirlenmesi şeklindedir. Bu ölçme yönteminde lazer tarayıcı, GNSS ve pusula eksenlerinin konfigürasyonu ve ölçme tekniği sonuç hassasiyetini etkilemektedir.

Üçüncü yöntem; tarayıcı üzerine monte edilen GNSS alıcısı ile sadece lazer tarama istasyonlarının koordinatlarının belirlenmesi şeklindedir. Bu yöntemin uygulamasında üç yada daha fazla istasyondan tarama yapılmış olması ve bu nokta bulutlarının birleştirilmiş olması gerekir. Nokta bulutları birleştirildikten sonra en az üç istasyonda hem lazer tarayıcı hemde jeodezik koordinatlı noktalar olacağı için nokta bulutu modelinin dönüklüğü istasyon noktalarının koordinatları ile hesaplanır [115]. Benzer bir yöntemle Altuntas ve diğ. [116], ulusal TUSAGA-Aktif (CORS-TR) sistemine dayalı olarak doğrudan jeodezik koordinatlı tarama gerçekleştirmiştir.

Dördüncü yöntem; tarayıcı üzerine entegre edilen iki GNSS alıcısı ile her tarama verisinin jeodezik koordinatları doğrudan elde edilebilmektedir [117]. Açık alan ölçmeleri için üretilen son dönem lazer tarayıcıların bazı modellerinde iki GNSS alıcı anteni entegre halde bulunmaktadır (örneğin Riegl VZ-6000). Dolayısıyla bu tarayıcılarla yapılan her ölçü doğrudan jeodezik koordinat sisteminde elde edilmektedir. Ancak, ölçme mesafesi ile orantılı olarak jeodezik koordinatlandırma hatası artacaktır. Bazı lazer tarayıcılarda ise tek bir GNSS alıcısı entegre olarak bulunmakta, isteğe bağlı olarak pusula, jiroskop yada barometre takılabilmektedir (örneğin Z-F Imager 5010X) (bkz.Tablo 1). Lazer tarayıcı aletlerinin teknolojik evrimi göz önüne alındığında ise; yakın gelecekte açık arazi ölçmelerinde kullanılabilecek tüm lazer tarayıcıların doğrudan jeodezik koordinatlı ölçme yapılabilecek kabiliyette olacağı söylenebilir.

Tablo 3. Yersel lazer tarama nokta bulutlarının jeodezik koordinat sistemine dönüştürülmesi yöntemleri

| Jeodezik Koordinatlandırma Yöntemi | Konfigürasyon                            | Referans Çalışmalar                      |
|------------------------------------|--|--|
| Dolaylı                            | Kontrol noktası                          | Scaioni03<br>Elkharachy06                |
| Doğrudan                           | TLS+teodolit                             | Scaioni05<br>Lichti05<br>Lichti04        |
|                                    | TLS+GNSS, GNSS+hedef işareti             | Balzani02<br>Martensson12<br>Reshetyuk10 |
|                                    | TLS+GNSS+Digital Pusula                  | Bohm06<br>Schuhmacher05<br>Paffenholz12  |
|                                    | TLS+GNSS                                 | Altuntas14<br>Olsen09                    |
|                                    | TLS+2GNSS                                | Wilkinson10                              |
| Veri işleme                        | Nokta bulutu birleştirme, Görüntü işleme | Böhm05<br>Schuhmacher05                  |

#### 4.3 Veri İşlemeye Dayalı Jeodezik Koordinatlandırma

Bu yöntem, lazer tarama ölçülerinin daha önceden jeodezik koordinat sistemine dönüştürülmüş lazer tarama ölçüleri ile yada diğer verilerle birleştirilmesi şeklinde uygulanmaktadır. Bu birleştirme yukarıda anlatılan nokta bulutu birleştirme yöntemlerinden birisi ile yapılabilir. Yada görüntü işleme teknikleri kullanılabilir.

Bu birleştirme yöntemi lazer tarayıcı ile oluşturulan modellerin özellikle sayısal yükseklik modelleri ile birleştirilmesi için gereklidir. Diğer yandan sayısal yükseklik modeli hava LIDAR'ı ile oluşturulmuş ise bu durumda yersel ve hava LIDAR nokta bulutlarının birleştirilmesi şeklinde uygulanmaktadır [118]. Özellikle kent modelleme çalışmalarında sayısal arazi modeli ile yersel lazer tarama ölçülerinin birleştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır [105].

## 5. Sonuç

Yersel lazer tarama üç boyutlu modellemede etkin bir konumsal veri toplama yöntemidir. Yersel lazer tarayıcıların ölçme kabiliyetleri her geçen gün geliştirilmekte ve kullanım alanları genişlemektedir. Buna paralel olarak veri işleme ve nokta bulutlarının birleştirilmesinde de yeni teknikler geliştirilmektedir. Bindirme oranı, lazer tarama tekniği ve model doğruluğu gibi unsurlar nokta bulutlarının birleştirilmesinde farklı tekniklerin kullanılmasını gerektirir.

Uluslararası Fotogrametri ve Uzaktan Algılama Birliği (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing) nin vizyon hedeflerinden birisi konumsal veri üretimi ve 3B modellemede otomasyonun sağlanmasıdır. Bu amaca uygun olarak nokta bulutlarının birleştirilmesinde nihai amaç, işlem hızı ve doğruluğun artırılması ve otomasyonun sağlanmasıdır. Nokta bulutlarının otomatik birleştirilmesi için pek çok yöntem geliştirilmiştir. Yaklaşık yöneltme yapıldıktan sonra hassas yöneltme için İEYN yöntemi neredeyse standart bir yöntem olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Ancak her türlü veri setinin tam otomatik olarak birleştirilmesinde kullanılabilir bir yöntem mevcut değildir. Bu nedenle lazer tarayıcı nokta bulutlarının birleştirilmesi geomatik mühendisliği ve bilgisayar teknolojisi alanındaki araştırmacılar için önemli bir araştırma konusudur. Bazı birleştirme yöntemlerinin etkili bir şekilde kullanılabilmesi doğrudan bilgisayarların kapasite ve hızlarına bağlıdır. Bilgisayarların veri işleme kapasiteleri ve hızları arttıkça yeni teknikler geliştirileceği açıktır. Son yıllarda geliştirilen birleştirme tekniklerinin 3B detay noktası eşleştirme, optimizasyon ve genetik algoritma yöntemleri üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. İşlemci hızı ve kapasitesi özellikle bu yöntemlerle yapılan birleştirmeler için önemlidir. Dolayısıyla işlemcilerin kapasitesi arttıkça bu alandaki çalışmaların daha da geliştirileceği değerlendirilmektedir. Nokta bulutlarının birleştirilmesinde ortak tarama alanının büyüklüğü ve olası hatalı noktalar birleştirme doğruluğunu etkilemektedir. Diğer yandan tarama noktalarının yoğunluğunda birleştirme doğruluğuna etki etmektedir. Sonuç olarak nokta bulutu birleştirme yöntemlerinin doğruluğu uygulanan dönüşüm algoritmasına ilave olarak; tarama nokta yoğunluğu, hatalı noktalar ve bindirme oranının büyüklüğüne bağlıdır. Lazer tarama yöntemleri için diğer bir karşılaştırma ölçütü ise işlem hızıdır.

Hangi yöntem kullanılırsa kullanılsın nokta bulutlarının ardışık birleştirilmesi birikimsel hatalar doğuracaktır. Birleştirilen nokta bulutu sayısı arttıkça da bu hatanın büyüklüğü artacaktır. Bu hatanın etkisini gidermek için tüm modele global dönüşüm uygulanmalıdır. Global dönüşümde tüm nokta bulutları için dönüşüm parametreleri aynı anda hesaplanmaktadır.

Diğer yandan nokta bulutları ile oluşturulan modelin diğer konumsal verilerle ilişkilendirilmesi ve jeodezik koordinat sistemine dönüştürülmesi gerekir. Bunun için farklı yöntemler geliştirilmiş olsa da, daha çok lazer tarayıcı ile birlikte kullanılan GNSS ölçülerine ağırlık verilmektedir. Bu nedenle yeni nesil lazer tarayıcıların GNSS

ile birlikte konfigüre edildiği görülmektedir. Çok yüksek hassasiyet istenmeyen ve ölçme mesafesi ortalama 200m civarında olan çalışmalarda çift GNSS alıcılı lazer tarayıcılar kullanılabilir. Ülkemizde kurulu TUSAGA-Aktif (CORS-TR) ağı sayesinde açık alan ölçmelerinde tek GNSS alıcısı ile herhangi bir ek ölçüye gerek kalmadan nokta bulutlarının jeodezik koordinat sistemine dönüşümü mümkün olabilmektedir.

### **Kaynaklar**

- [1] Altuntas, C., Yildiz, F., Baygul, E., 2014, Documentation of historical structures in the courtyard of Mevlana Museum by terrestrial LIDAR and Photogrammetry, *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, Vol. 14, No. 2, pp. 249-258.
- [2] Boehm, J., 2009, Terrestrial LiDAR in Urban Data Acquisition, In: Fritsch,, (ed.) *Photogrammetric Week '09*, Wichmann Verlag: Heidelberg, pp. 169-178.
- [3] Altuntas, C., Yildiz, F., 2013, Point cloud registration and virtual realization of large scale and more complex historical structures, *ISPRS Conference on Serving Society with Geoinformatics*, Antalya, *ISPRS Archives–Vol. XL-7/W2*, 13-18, 11-17 November.
- [4] Barazzetti, L., Sala, R., Scaioni, M., Cattaneo, C., Gibelli, D., Giussani, A., Poppa, P., Roncoroni, F., Vandonec, A., 2012, 3D scanning and imaging for quick documentation of crime and accident scenes, *Proc. SPIE 8359, Sensors, and Command, Control, Communications, and Intelligence (C3I) Technologies for Homeland Security and Homeland Defense XI*, 835910, 14 pages, 18 June.
- [5] Altuntaş, C., Yıldız, F., 2008, Yersel lazer tarayıcı ölçme prensipleri ve nokta bulutlarının birleştirilmesi, *hkm Jeodezi, Jeoinformasyon ve Arazi Yönetimi Dergisi*, Cilt 2008/1, Sayı 98, pp. 20-27.
- [6] Pfeifer, N., Briese, C., 2007, Geometric aspects of airborne laser scanning and terrestrial laser scanning, *ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser*, Espoo, Finland, *ISPRS Archives-Vol. XXXVI, Part3/W52*, 311-319, September 12-14.
- [7] Schwarte, R., Heinol, H., Buxbaum, B., Ringbeck, T., Xu, Z., Hartmann, K., 1999, Principles of Three-Dimensional Imaging Techniques, in *Handbook of Computer Vision and Applications*, Jahne, B., Haussecker, H. and Geissler, P. (Eds.), Academic Press, ISBN 0-12-379771-3.

- [8] Chui, H., Rangarajan, A., 2003, A new point matching algorithm for non-rigid registration, *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 89, No. (2-3), pp. 114-141.
- [9] Wang, G., Wang, Z., Chen, Y., Zhao, W., 2015, A robust non-rigid point set registration method based on asymmetric Gaussian representation, *Computer Vision and Image Understanding*, DOI: 10.1016/j.cviu.2015.05.014
- [10] Tam, G.K.L., Cheng, Z.Q., Lai, Y.K., Langbein, F.C., Liu, Y., Marshall, D., Martin, R.R., Sun, X.F., Rosin, P.L., 2007, Registration of 3D Point Clouds and Meshes: A Survey From Rigid to Non-Rigid, *Journal of Latex Class Files*, Vol. 6, No. 1, pp. 1-20.
- [11] Diez, Y., Roure, F., Llado, X., Salvi, J., 2015, A qualitative review on 3D coarse registration methods, *ACM Computing Surveys*, Vol. 47, No. 3, Article 45, p.36 pages.
- [12] Besl, P.J., McKay, N.D., 1992, A method for registration of 3-D shapes, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 14, No. 2, pp. 239-256.
- [13] Chen, Y., Medioni, G., 1992, Object modelling by registration of multiple range images, *Image and Vision Computing*, Vol. 10, No. 3, pp. 145–155.
- [14] Johnson, A.E., Kang, S.B., 1999, Registration and integration of textured 3D data, *Image and Vision Computing*, Vol. 17, No. 2, pp. 135-147.
- [15] Fitzgibbon A.W., 2003, Robust registration of 2D and 3D point sets, *Image and Vision Computing*, Vol. 21, No. 13, pp. 1145–1153.
- [16] Chetverikov D., Stepanov, D., Krsek, P., 2005, Robust Euclidean alignment of 3D point sets: the trimmed iterative closest point algorithm, *Image and Vision Computing*, Vol. 23, No. 3, pp. 299-309.
- [17] Liu Y., 2006, Automatic registration of overlapping 3D point clouds using closest points, *Image and Vision Computing*, Vol. 24, No. 7, pp. 762–781.
- [18] Bae K., Lichti D.D., 2008. A method for automated registration of unorganised point clouds, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 63, No. 1, pp. 36–54.

- [19] Altuntas, C., 2014a, The effect of point density on the registration accuracy of a terrestrial laser scanning dataset, *Lasers in Engineering*, Vol. 28, No. (3-4), pp. 213-221.
- [20] Pomerleau, F., Colas, F., Siegwart, R., Magnenat, S., 2013, Comparing IĖYN variants on real-world data sets, *Autonomous Robots*, Vol. 34, No. 3, pp. 133–148.
- [21] Bellekens, B., Spruyt, V., Berkvens, R., Weyn, M., 2014, A survey of rigid 3D pointcloud registration algorithms, *The Fourth International Conference on Ambient Computing, Applications, Services and Technologies*, Rome, Italy, 8-13, 24-28 August.
- [22] Gruen, A., 1985, Adaptive least squares correlations: A powerful image matching technique, *South African Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography*, Vol. 14, No. 3, pp. 175-187.
- [23] Gruen, A., Akca, D., 2005, Least squares 3D surface and curve matching, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 59, No. 3, pp. 151-174.
- [24] Akca, D., 2004, A new algorithm for 3D surface matching, *20th ISPRS Congress*, Istanbul, Turkey, *ISPRS Archives-Vol. XXXV, Part B5*, 1020-1025, 12-23 July.
- [25] Akca, D., Gruen, A., 2005, Fast correspondance search for 3D surface matching, *ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop Laser scanning 2005*, Enschede, The Netherlands, *ISPRS Archives – Vol. XXXVI-3/W19*, 186-191, September 12-14.
- [26] Akca, D., 2007, Matching of 3D surfaces and their intensities, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 62, No. 2, pp. 112-121.
- [27] Chen, Y., Medioni, G., 1991. Object modelling by registration of multiple range images, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Sacramento, CA, 2724–2729, 9–11 April.
- [28] Grant, D., Bethel, J., Crawford, M., 2012, Point-to-plane registration of terrestrial laser scans, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 72, pp. 16-26.
- [29] Masuda, T. 2002, Object shape modelling from multiple range images by matching signed distance fields, *IEEE First International Symposium on 3D Data Processing Visualization and Transmission*, Padova, Italy, 439–448, June 19-21.

- [30] Masuda, T., 2001, Generation of geometric model by registration and integration of multiple range images, IEEE Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, Quebec City, Que, 254–261, 28 May-01 Jun.
- [31] Tarel, J.P., Boujemaa, N., 1999, A coarse to fine registration method based on robust fuzzy clustering, *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 73, No. 1, pp. 14-28.
- [32] Lomonosov, E., Chetverikov, D., Ekart, A., 2006, Pre-registration of arbitrarily oriented 3D surfaces using a genetic algorithm, *Pattern Recognition Letters*, Vol. 27, No. 11, pp. 1201–1208.
- [33] Hanke, K., Schenk, S., 2014, A genetic algorithm approach for the rigorous registration of arbitrary laser scanner point clouds, *Engineering Computation* (in Gunter H editor), Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London.
- [34] Silva, L., Bellon, O.R.P., Boyer, K.L., 2007, Multiview range image registration using the surface interpretation measure, *Image and Vision Computing*, Vol. 25, No. 1, pp. 114-125.
- [35] Liu, H., Yan, J., Zhang, D., 2006, “Three-dimensional surfaces registration: A neural network strategy”, *Neurocomputing*, Vol. 70, No. (1-3), pp. 597-602.
- [36] Salvi, J., Matabsoch, C., Fofi, D., Forest, J., 2007, “A review of recent range image registration methods with accuracy evaluation”, *Image and Vision Computing*, Vol. 25, No. 5, pp. 578-596.
- [37] Chow, C., Tsui, H., Lee, T., 2004, Surface registration using a dynamic genetic algorithm, *Pattern Recognition*, Vol. 37, No. 1, pp. 105–117.
- [38] Yamany, S.M., Ahmed, M.N., Farag, A.A., 1999. A new genetic-based technique for matching 3d curves and surfaces, *Pattern Recognition*, Vol. 32, No. 10, pp. 1817, 1999.
- [39] Theiler, P.W., Wegner, J.D., Schindler, K., 2014, Keypoint-based 4-points Congruent Sets - Automated marker-less registration of laser scans, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 96, pp. 149-163.
- [40] Mutzel, A., Neuhaus, F., Paulus, D., 2015, Geometric features for robust registration of point clouds, *Pattern Recognition and Image Analysis*, Vol. 25, No. 2, pp. 174-186.



- [41] Huang, J., You, S., 2012, Point cloud matching based on 3D self-similarity, IEEE Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), Providence, RI, 41-48, 16-21 June.
- [42] Cirujeda, P., Cid, Y.D., Mateo, X., Binefa, X., 2015, A 3D scene registration method via covariance descriptors and an avolutionary stable strategy game theory solver, International Journal Computer Vision, DOI 10.1007/s11263-015-0820-2.
- [43] He, B., Lin, Z., Li, Y.F., 2013. An automatic registration algorithm for the scattered point clouds based on the curvature feature, Optics and Laser Technology, Vol. 46, pp. 53-60.
- [44] Körtgen, M., 2007, Robust automatic registration of range images with reflectance, Diplomarbeit, Vorgelect am Institut for Informatic, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- [45] Weinmann, Ma., Weinmann, Mi., Hinz, S., Jutzi, B., 2011, Fast and automatic image-based registration of TLS data, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 66, No. 6, pp. S62-S70.
- [46] Han, J.Y., Perng, N.H., Lin, Y.T., 2013, Feature conjunction for intensity-coded LIDAR point clouds, Journal of Surveying Engineering, Vol. 139, No. 3, pp. 135-142.
- [47] Altuntas, C., 2014b. Pair-wise automatic registration of three-dimensional laser scanning data from historical building by created two-dimensional images, Optical Engineering, Vol. 53, No. 5, Article 053108, pp. 1-6.
- [48] Bendels, G.H., Degener, P., Wahl, R., Körtgen, M., Klein, R., 2004, Image-based registration of 3d-range data using feature surface elements, The 5th international symposium on virtual reality, Archeology and Cultural Heritage (VAST-2004), Oudenaarde, Belgium, 115-124, December 7-10.
- [49] Boehm, J., Becker, S., 2007, Automatic Marker-Free Registration of Terrestrial Laser Scans using Reflectance Features, 8th Conference on Optical 3D Measurement Techniques, Zurich, Switzerland, 338-344, 9-12 July.
- [50] Smith, E.R., King, B.J., Stewart, C.V., Radke, R.J., 2008, Registration of combined range-intensity scans: Initialization through verification, Computer Vision and Image Understanding, Vol. 110, No. 2, pp. 226-244.

- [51] Barnea, S., Filin, S., 2008, Keypoint based autonomous registration of terrestrial laser point-clouds, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 63, No. 1, pp. 19-35.
- [52] Kang, Z., Li, J., Zhang, L., Zhao, Q., Zlatanova, S., 2009, Automatic registration of terrestrial laser scanning point clouds using panoramic reflectance images, *Sensors*, Vol. 9, pp. 2621-2646.
- [53] Chung, D.H., Yun, I.D., Lee, S.U., 1998, Registration of multiple-range views using the revers-calibration technique, *Pattern Recognition*, Vol. 31, No. 4, pp. 457-464.
- [54] Liu, R., Hirzinger, G., 2005, Marker-free automatic matching of range data, *Panoramic Photogrammetry Workshop*, Berlin, Germany, *ISPRS Archives–Vol. XXXVI-5/W8*, 5 pages, 24-25 February.
- [55] Mian, A.S., Bennamoun, M., Owens, R.A., 2006, A novel representation and feature matching algorithm for automatic pairwise registration of range images, *International Journal of Computer Vision*, Vol. 66, No. 1, pp. 19-40.
- [56] Liao, Y., Xu, F., Zhao, X., Hagivara, X., 2014, A point cloud registration method based on point cloud region and application samples, S. Tanaka et al. (Eds.): *AsiaSim 2014*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, CCIS 474.
- [57] Dold, C., 2005, Extended Gaussian images for the registration of terrestrial scan data, *ISPRS Workshop Laser Scanning 2005*, Enschede, the Netherlands, *ISPRS Archives – Vol. XXXVI-3/W19*, 180-185, September 12-14.
- [58] Makadia A., Patterson A. and Daniilidis K., 2006, Fully automatic registration of 3D point clouds, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, New York, NY, 1297-1304, 18-20 June.
- [59] Berner, A., Bokeloh, M., Wand, M., Schilling, A., Seidel, H. P., 2008, A graph-based approach to symmetry detection, In *Symposium on volume and point-based graphics*, Eurographics Association, Los Angeles, pp. 1-8.
- [60] Ergun, B., 2010, A novel 3D geometric object filtering function for application in indoor area with terrestrial laser scanning data, *Optics and Laser Technology*, Vol. 42, No. 5, pp. 799-804.

- [61] Zhang, D., Huang, T., Li, G., Jiang, M., 2012. Robust algorithm for registration of building point clouds using planar patches, *Journal of Surveying Engineering*, Vol. 138, No. 1, pp. 31-36.
- [62] Theiler, P.W., Schindler, K., 2012, Automatic registration of terrestrial laser scanner point clouds using natural planar surfaces. XXIIth ISPRS Congress, Melbourne, Australia, *ISPRS Annals*, Volume I-3, 173-178, 25 August–01 September.
- [63] Friedman, S., Stamos, I., 2012, Online detection of repeated structures in point clouds of urban scenes for compression and registration, *International Journal of Computer Vision*, Vol. 102, No. (1-3), pp. 112-128.
- [64] Schnabel, R., Wahl, R., Klein, R., 2007, Efficient RANSAC for point-cloud shape detection, *Computer Graphics Forum*, Vol. 26, No. 2, pp. 214-226.
- [65] He, W., Ma, W., Zha, H., 2005, Automatic registration of range images based on correspondence of complete plane patches, *IEEE Fifth International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling (3DIM)*, Ottawa, Ontario, Canada, 470-475, 13-16 June.
- [66] Benjemaa, R., Schmitt, F., 1999, Fast global registration of 3D sampled surfaces using a multi-z-buffer technique, *Image and Vision Computing*, Vol. 17, No. 2, pp. 113-123.
- [67] Pulli, K., 1999, Multiview registration for large data sets, *IEEE 2nd International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, Ottawa, Ontario, 160–168, 04 Oct-08 Oct.
- [68] Nurunnabi, A., Belton, D., West, G., 2014, Robust statistical approaches for local planar surface fitting in 3D laser scanning data, *IPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 96, pp. 106-122.
- [69] Breuel, T.M., 2003, Implementation techniques for geometric branch-and-bound matching methods, *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 90, No. 3, pp. 258-294.
- [70] Olsson, C., Kahl, F., Oskarsson, M., 2009, Branch-and-bound methods for Euclidean registration problems, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 31, No. 5, pp. 783-794.

- [71] Li, H., Hartley, R.I., 2007, The 3D-3D registration problem revisited, IEEE 11th International Conference on Computer Vision, Rio de Janeiro, 1-8, 14-21 October.
- [72] Bonarrigo, F., Signoroni, A., 2014, Global registration of large collections of range images with an improved Optimization-on-a-Manifold approach, *Image and Vision Computing*, Vol. 32, No. (6-7), pp. 437–451.
- [73] Papazov, C., Burschka, D., 2011, Stochastic global optimization for robust point set registration, *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 115, No. 12, pp. 1598-1609.
- [74] Lee, P.Y., 2005, Geometric optimization for computer vision, Ph.D. Thesis, Australian National University, Canberra.
- [75] Bougborbel, F., Mercimek, M., Koschan, A., Abidi, M., 2010, A new method for the registration of three-dimensional point-sets: The Gaussian fields framework, *Image and Vision Computing*, Vol. 28, No. 1, pp. 124-137.
- [76] Huber, D., Hebert, M., 2003, Fully automatic registration of multiple 3D data sets, *Image and Vision Computing*, Vol. 21, No. 7, pp. 637-650.
- [77] Mateo, X., Orriols, X., Binefa, X., 2014, Bayesian perspective for the registration of multiple 3D views, *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 118, pp. 84-96.
- [78] Ripperda, N., Brenner, C., 2005, Marker-free registration of terrestrial laser scans using the normal distribution transform, 3D-ARCH Workshop, Mestre-Venice, Italy, ISPRS Archives–Vol. XXXVI-5/W17, 7 pages, 22-24 August.
- [79] Pottman, H., Huang, Q.X., Yang, Y.L., Hu, S.M., 2006, Geometry and convergence analysis of algorithms for registration of 3D shapes, *International Journal of Computer Vision*, Vol. 67, No. 3, p. 277-296.
- [80] Krishnan, S., Lee, P.Y., Moore, J.B., Venkatasubramanian, S., 2005, Global registration of multiple 3D point sets via optimization-on-a-manifold, Third Eurographics Symposium on Geometry Processing, Vienna, Austria, July 4-6.
- [81] Krishnan, S., Lee, P.Y., Moore, J.B., Venkatasubramanian, S., 2007, Optimisation-on-a manifold for global registration of multiple 3D point sets, *International Journal Intelligent Systems Technologies and Applications*, Vol. 3, No. (3/4), pp. 319–340

- [82] Fischler, M.A., Bolles, R.C., 1981, Random Sample Consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography, *Graphics and image processing*, Vol. 24, No. 6, pp. 381-395.
- [83] Chen, C.S., Hung, Y.P., Cheng, J.B., 1999, RANSAC-Based DARCES: A new approach to fast automatic registration of partially overlapping range images, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 21, No. 11, pp. 1229-1234.
- [84] Li, X., Ning, Z., Xiang, L., 2005, Robust 3D reconstruction with outliers using RANSAC based singular value decomposition, *IEICE Transactions on Information and Systems*, Vol. E88-D, No. 8, pp. 2001-2004.
- [85] Xiao, G., Ong, S.H., Foong, K.W.C., 2007, 3D registration of partially overlapping surface using a volumetric approach, *Image and Vision Computing*, Vol. 25, No. 6, pp. 934-944.
- [86] Feldmar, J., Ayache, N., 1994, Rigid, Affine and locally affine registration of free-form surfaces, *Research Report, RR-2220, 1994. (inria-00074451)*.
- [87] Reyes, L., Medioni, G., Bayro, E., 2007, Registration of 3D points using geometric algebra and tensor voting, *International Journal of Computer Vision*, Vol. 75, No. 3, pp. 351-369.
- [88] Robertson, C., Fisher, R.B., 2002, Parallel evolutionary registration of range data, *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 87, No. (1-3), pp. 39-50.
- [89] Tarel, J., Civi, H., Cooper, D., 1998, Pose estimation of free-form 3d objects without point matching using algebraic surfaces models, *IEEE workshop on Model-Based 3D Image Analysis*, 13-21, January 3.
- [90] Flöry, S., 2010, Constrained matching of point clouds and surfaces, *Ph.D. studies in Applied Geometry*, Vienna University of Technology, Fakultät für Mathematic und Geoinformation, Austria.
- [91] Yang, B., Zang, Y., 2014, Automated registration of dense terrestrial laser-scanning point clouds using curves, *ISPRS Journal of Photogrametry and Remote Sensing*, Vol. 95, pp. 109-121.
- [92] Wyngaerd, J.V., Gool, L.V., 2002, Automatic crude patch registration: toward automatic 3D model building, *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 87, No. (1-3), pp. 8-26.

- [93] Stamos, I., Leordeanu, M., 2003, Automated feature-based range registration of urban scenes of large scale, IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Vol. 2, 555-561, 18-20 June.
- [94] Chao, C., Stamos, I., 2005, Semi-automatic range to range registration: a feature-based method, IEEE Fifth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, Ottawa, Ontario, Canada, 254-261, 13-16 June.
- [95] Scaioni, M., Forlani, G., 2003, Independent model triangulations of terrestrial laser scanner data, In proc. of Vision Techniques for Digital Architectural and Archaeological Archives, Portonovo - Ancona , Italy, ISPRS Archives–Vol. XXXIV-5/W12, 308-313, July 1-3.
- [96] Akca, D., 2003, Full automatic registration of laser scanner point clouds, In: Gruen, A., Kahmen, H. (Eds.), Optical 3-D Measurement Techniques VI, Zurich, Switzerland, September 22-25, vol. I, 330-337.
- [97] Wendt, A., Dold, C., 2005, Estimation of interior orientation and eccentricity parameters of a hybrid imaging and laser scanning sensor, Panoramic Photogrammetry Workshop, Berlin, Germany, ISPRS Archives–Vol. XXXVI-5/W8, 7 pages, 24-25 February.
- [98] Al-Manasir, K., Fraser, C.S., 2006a, Registration of terrestrial laser scanner data using imagery, The Photogrammetric Record, Vol. 21, No. 115, pp. 255-268.
- [99] Altuntas, C., Yildiz, F., 2012. The registration of laser scanner three-dimensional point clouds using two-dimensional images recorded with a sensor combination camera, Lasers in Engineering, Vol. 23, No. (3-4), pp. 163-181.
- [100] Wyngaerd, J.V., Gool, L.V., 2003, Combining texture and shape for automatic crude patch registration, IEEE Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, Alberta, Canada, 179-186, 6-10 October.
- [101] Barnea, S., Filin, S., 2007, Registration of terrestrial laser scans via image based features, ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and Silvilaser 2007, Espoo, Finland, ISPRS Archives–Vol. XXXVI-3/W52, 32-37, September 12-14.
- [102] Al-Manasir, K., Fraser, C.S., 2006b, Automatic registration of terrestrial laser scanner data via imagery, ISPRS Commission V Symposium, Dresden, ISPRS Archives – Vol. XXXVI, Part 5, 6 pages, September 25-27.

- [103] Dold, C., Brenner, C., 2006, Registration of terrestrial laser scanning data using planar patches and image data, ISPRS Commission V Symposium, Dresden, Germany, ISPRS Archives–Vol. XXXVI Part 5, 78-83, September 25-27.
- [104] Perfetti, N., Pellegrinelli, A., Ursa, M.G.D., Russo, P., 2005, A combined system of digital photogrammetry and laser scanning, CIPA XXth International Symposium, Torino, Italy, 4 pages, 26 September-01 October.
- [105] Schuhmacher, S., Böhm, J., 2005, Georeferencing of terrestrial laser scanner data for applications in architectural modeling, 3D-ARCH Workshop, Mestre-Venice, Italy, ISPRS Archives Vol. XXXVI-5/W17, 7 pages, 22-24 August.
- [106] Scaioni, M., 2005. Direct georeferencing of TLS in surveying of complex sites, 3D-ARCH Workshop, Mestre, Venice, Italy, ISPRS Archives-Vol. XXXVI-5/W17, 8 pages, 22-24 August.
- [107] Elkharachy, I., Neimeier, W., 2006. Optimization and strength aspects for georeferencing data with terrestrial laser scanner systems, 3D IAG712th FIG symposium, Baden, Austria, p.10 pages, May 22-24.
- [108] Lichti, D.D., Gordon, S.J., 2004, Error propagation in directly georeferenced terrestrial laser scanner point clouds for cultural heritage recording, FIG Working Week, Athens, Greece, 1-16, May 22-27.
- [109] Lichti, D.D., Gordon, S.J., Tipdecho, T., 2005. Error models and propagation in directly georeferenced terrestrial laser scanner networks, Journal of Surveying Engineering, Vol. 131, No. 4, pp. 135-142.
- [110] Balzani, M., Pellegrinelli, A., Perfetti, N., Russo, P., Uccelli, F., Tralli, S., 2002, CyraxTM 2500 Laser Scanner and GPS operational flexibility: From Detailed Close Range Surveying to urban Scale Surveying, Proc. CIPA WG 6 int. WS scanning for cultural heritage recording, Corfu, 27-32, September 1-2,.
- [111] Reshetyuk, Y., 2010, Direct georeferencing with GPS in terrestrial laser scanning, Zeitschrift für Geodasie, Geoinformation und Landmanagement, Vol. 1335, No. 3, pp. 151-159.
- [112] Martensson, S.G., Reshetyuk, Y., Jivall, L., 2012, Measurement uncertainty in network RTK GNSS-based positioning of a terrestrial laser scanner, Journal of Applied Geodesy, Vol. 6, No. (1), pp. 25-32.

- [113] Böhm, J., Haala, N., Alshwabkeh, Y., 2006. Automation in laser scanning for cultural heritage applications. In: Baltsavias, E., Gruen, A., Van Gool, L., Pateraki, M. (Eds.), *Recording, Modeling and Visualization of Cultural Heritage*, Taylor & Francis Group, London, pp. 443–450.
- [114] Paffenholz, J.A., 2012, Direct geo-referencing of 3D point clouds with 3D positioning sensors, PhD Dissertation, Deutsche Geodatische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München.
- [115] Olsen, M.J., Johnstone, E., Driscoll, N., Ashford, S.A., Kuester, F., 2009, Terrestrial laser scanning of extended cliff sections in dynamic environments: Parameter Analysis, *Journal of Surveying Engineering*, Vol. 135, No. 4, pp. 161-169.
- [116] Altuntas, C., Karabork, H., Tusat, E., 2014, Georeferencing of ground-based LIDAR data using continuously operating reference stations, *Optical Engineering*, Vol. 53, No. 11, Article 114110, pp. 1-7.
- [117] Wilkinson, B.E., Mohamed, A.H., Dewitt, B.A., Seedahmed, G.H., 2010, A novel approach to terrestrial lidar georeferencing, *Photogrammetric Engineering Remote Sensing*, Vol. 76, No. 6, pp. 683-690.
- [118] Böhm, J., Haala, N., 2005, Efficient integration of aerial and terrestrial laser data for virtual city modeling using lasermaps, In: Vosselman, G., Brenner, C. (Eds.), *ISPRS Workshop Laser Scanning 2005*, Enschede, the Netherlands, *ISPRS Archives Vol. XXXVI-3/W19*, 192-197, September 12-14.