

# Yeraltı Madenlerinde Robotik Ölçme Sistemi ile Yapısal Deformasyonların İzlenmesi

Caner Güney<sup>1,\*</sup>, Serdar Bora Sayın<sup>2</sup>, Banu Sayın<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Istanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, 34469, İstanbul.

<sup>2</sup>Istanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Geomatik Mühendisliği Programı, 34469, İstanbul.

<sup>3</sup>Solvotek Mühendislik ve Bilişim Hizmetleri, 34381, İstanbul.

## Özet

Her ne kadar yeraltı maden ocaklarındaki üretim süreci üç boyutlu olarak gerçekleştirilse de maden haritaları genelde iki boyutlu (2B) olarak üretilmektedir. Haritaların 2B olması yeraltındaki hacimsel hesapların yapılmasında ya da yeraltı maden ocağının yapısal sağlamlığının değerlendirilmesinde yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle 3B mekansal modellere (volumetric map) gereksinim bulunmaktadır. 3B modelleri hızlı ve kolay bir biçimde elde etme yolu lazer taramadır. İnsanlar için yeraltı maden koşullarında çalışmanın zorlu ve tehlikeli olması ve harita üretiminin daha hızlı ve etkin gerçekleştirilebilmesi için mekansal verilerin robotlar tarafından üretilmesi maden işletmesinin verimliliği artıracak ve iş güvenliği de sağlanmış olacaktır. Lazer tarayıcılarla yeraltı maden ocaklarının 3B olarak ölçülmesi yeni bir konu değildir. Bu çalışmanın farklılığı çalışma kapsamında önerilen mühendislik çalışma gereksinimlerini karşılayacak 3B taramanın termal algılamayla birlikte robotik bir platformda gerçekleştirilmesi ve sonuçların karar-destek amacıyla kullanılması için mekansal bilgi sistemi üzerinden karar vericilere sunulmasıdır.

## Anahtar Sözcükler

Madencilik Ölçmeleri, Lazer Tarama, Gezgin Robot, İnsansız Yer Aracı, CBS, Karar Destek

## Abstract

Although the process of production in underground mines is performed as 3D, mine maps are generally produced as 2D. Even when accurate maps exist, they provide information only in 2D, which is usually insufficient to assess the structural soundness of underground mines. Accurate 3D models (volumetric maps) of underground mines would be of great relevance to structural stability assessment. A surveying and monitoring robotic system which can be remotely operated and/or can work autonomously robot can be used as ground vehicle for underground mining. Such an automation of underground mining must occur in a manner that is economically beneficial to the industry and that enhances the safety of the underground and labor. In the scope of this study how navigation parameters of the robot will be produced and how point clouds of the 3D scanner will be registered. Another subject for the study is how to setup a special decision support system for fused sensor data sets.

## Keywords

Mine Surveying, Laser Scanning, Mobile Robot, Unmanned Ground Vehicle, GIS, Decision Support

## 1. Giriş

Dünya genelinde madencilik endüstrisinde araştırmacıların ve uygulamacıların ciddi bir biçimde önem verdikleri iki konu madencilik uygulamalarındaki “iş sağlığı ve güvenliğinin sağlanması” ile “üretkenliğin ve verimliliğin artırılması”dır. Amerika Birleşik Devletleri, Avustralya, Güney Afrika Cumhuriyeti vb. madencilik uygulamalarının gelişmiş olduğu ülkelerde yasa, yönetmelik ve eylemlerde işverenlerin maden çalışanları için sağlıklı ve güvenli çalışma ortamlarını sağlamaları ve bu durumun sürdürülebilirliğinin gerekliliği ifade edilmektedir. Bu nedenle yer altı madenlerinde sürekli olarak izleme ve inceleme çalışmaları yapılarak güvenlik açısından riskli olacak alanlar önceden tespit edilmeye çalışılmakta ve buna ilişkin karar-destek (decision-support) süreçleri tehlike oluşmadan önce işletilebilmektedir. Bunun için de hassas, doğru, güvenilir ve ekonomik jeodezik ölçmelerin hızlı ve sürekli bir biçimde gerçekleştirilmesine gereksinim bulunmaktadır (Güney vd., 2015a).

Yer altı madencilik uygulamalarına yönelik olarak riskli alanlarda jeodezik ölçme çalışmalarını daha presizyonlu, doğru, güvenli, hızlı ve ekonomik bir biçimde gerçekleştirebilmek için çok amaçlı veri toplayabilen, duyarğa (algılayıcı, sensor) tabanlı gezgin (mobile) bir uygulama Ar-Ge robotu bütüncül bir sistem anlayışıyla geliştirilmiştir (<http://www.geo.itu.edu.tr/geoross/>). “Robotik Ölçme ve İzleme Sistemi (Geo-enable Robotic Surveying System: GeoRoSS)” ile yer altı ortamlarında bulunan farklı tür madenlere erişilerek jeodezik ölçme kalitesindeki veriler elde edilmekte, değerlendirilmekte, modellenmekte, mekan-sal analiz ve karar-destek aşamasında kullanılarak özellikle madenlerin yapısal deformasyonları izlenmektedir. Şekil 1’de bir uygulama Ar-Ge projesinin ürünü olan ve test robotu olarak kullanılan ‘GeoRoSS’ gösterilmektedir.

Sürekli gözlem ve ölçme yapmaya dayalı bir sistem olan ‘GeoRoSS’ elde ettiği jeodezik kalitedeki mekansal verileri mühendislik projeleri için yeterli çözünürlükte anlamlı bir biçimde bütünleştirtikten sonra yeraltı maden ocağının üç boyutlu (3B) mekansal modelini üretmekte ve bu model o maden ocağı için geliştirilen Mekansal Bilgi Sistemi (Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS), Geospatial Information System (GIS))’nin temelini oluşturmaktadır. Sözü edilen Mekansal Bilgi Sistemi kullanılarak

\* Sorumlu Yazar E-posta: [guneycan@itu.edu.tr](mailto:guneycan@itu.edu.tr) (Caner Güney)

üretilen mekansal altlıklar (haritalar) üretimin yönlendirilmesinde, veriminin artırılmasında, tünel içi deformasyonların belirlenmesinde, kaza olduğunda arama-kurtarma faaliyetlerinin planlanmasında kullanılabilecektir.

Çalışmanın temel konusu çok fonksiyonlu robotik ölçme sisteminin navigasyon parametrelerinin üretilmesi, jeodezik ölçmelerle ilişkilerinin kurulması ve 3B lazer tarayıcı tarafından üretilen 3B nokta bulutlarının navigasyon parametreleri kullanılarak çakıştırılmasıdır (*automatic registration*). Çalışmanın bir diğer konusu da ortam bilgilerinin mekansal verilerle birleştirilerek GIS tabanlı mekansal karar-destek (*spatial decision support*) sisteminin oluşturulması (Güney vd., 2015b) ve yer altı ortamlarında geometrik şekil değişimlerinin, hacimsel değişimlerin belirlenmesi çalışmalarının bu sistemde nasıl izlenebileceğinin açıklanmasıdır.



Şekil 1: Geliştirilen 'GeoRoSS'un görüntüsü

## 2. Yöntem

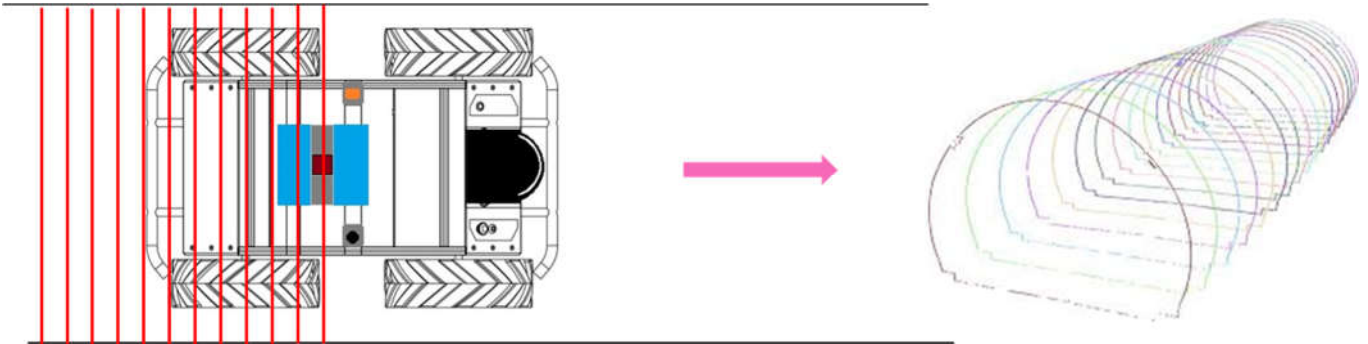
'GeoRoSS' karmaşık yeraltı ortamlarında çalışabilecek nitelikte duyarlarla (*perception sensors*) donatılmış çok fonksiyonlu bir ölçme ve izleme platformu ile yazılımlardan oluşan gezgin robotik bir sistemdir (Güney vd., 2015b).

Hareketli platform olarak engebeli ve zorlu arazi koşullarına uygun *Clearpath* firması tarafından geliştirilmiş olan Husky A200 insansız kara aracı (*Unmanned Ground Vehicle*, UGV) kullanılmaktadır. GeoRoSS kapsamında kullanılan duyarlar *SICK* firması tarafından üretilmiş olan LMS511 PRO lazer mesafe bulucu (*laser rangefinder*), *Xsens* firması tarafından üretilmiş olan MTi-G-700 eylemsizlik duyarı, *Zoller+Fröhlich* (*ZF*) firması tarafından üretilmiş olan Imager 5010 3B yersel lazer tarayıcı (*terrestrial laser scanner*) ve *ZF* firması tarafından üretilmiş T-Cam ısı görüntüleyicidir (*thermal camera*).

Gezgin robotta bulunan 3B lazer tarayıcı ile aşağıda ifade edilen ölçme teknikleri uygulanmaktadır:

- Dur ve Git Kesit Taraması (*Stop-and-Go Profile Scanning*)
- Sürekli Hareketli Kesit Taraması (*Kinematic/Continuous Profile Scanning*) (bkz. Şekil 2)
- Dur ve Git 3B Tarama (*Stop-and-Go 3D Scanning*)
- Sürekli 3B Tarama (*Kinematic/Continuous 3D Scanning*)

Yukarıda uygulanan her bir ölçme tekniği yeraltında 3B kesit bilgisini üretmeye olanak vermektedir.



Şekil 2. 'GeoRoSS' sürekli hareketli kesit taramasının çalışma ilkesinin görselleştirilmesi

Gezgin robotun yer altında ölçme yapabilmesi için öncelikle yer altı maden ocağında hareket ederken hem konumunu belirlemesi (*localization*), hem ortamın haritasını üretmesi (*mapping*) ve son olarak da yöringe planlaması (*path planning*) yapması gerekmektedir. Sözü edilen bu üç iş adımı (*task*) sistemin navigasyon bileşeninin sorumluluğundadır.

'GeoRoSS' üzerindeki navigasyon duyargaları (*range and inertia sensors*) kullanılarak robotun konum ve duruş kestirimi (*robot pose estimation*) yapılmakta ve hareket güzergahının/gezinesinin belirlenmesi (*trajectory estimation*) gerçekleştirilmekte, 3B yersel lazer tarayıcı aynasının zaman içerisindeki 3B konum bilgileri üretilmekte, nokta bulutları diğer duyargalardan üretilen bilgilerle eş zamanlı olarak oluşturulmakta ve sözü edilen tüm bilgiler bir algoritma ile birleştirilmektedir.

Mobil ölçme ve izleme sistemi üzerindeki duyargalarla ortamı ölçmekte ancak bu ölçmeler hataları da beraberinde getirmektedir. Ortamdaki belirsizlikler ve duyargaların gürültüleri robot navigasyonunda karşılaşılan en temel problemlerdir. Ölçmelerdeki belirsizliklerin giderilmesi için "Eş zamanlı Konum Belirleme ve Harita Üretme (*Simultaneous Localization and Mapping, SLAM*)" algoritmaları kullanılmaktadır. Stokastik SLAM olarak isimlendirilen ilk çalışma 1986 yılında önerilmiştir (Smith vd. 1987). Proje kapsamında yer altı ortamlarına özgü ve proje amacını karşılayabilecek doğrulukta bir SLAM yöntemi oluşturulmaya çalışılmaktadır. 'GeoRoSS'un bu yüksek doğruluğa hem otonom bir araç yapısı olabilmesi için hem de yüksek çözünürlüklü nokta bulutlarının yüksek doğrulukla ilişkilendirilebilmesi için gereksinimi bulunmaktadır.

Gezgin robotik alanında SLAM probleminin çözümü gezgin robotun kapalı alanlarda ya da açık alanlarda (arazide/karada, havada, su altında, uzayda) bulunmasına, yararlandığı algılayıcı (*sensor*) türlerine, kullandığı matematiksel yaklaşımlara bağlı olarak çok farklı biçimlerde uygulanmaktadır. SLAM probleminin genel kabul görmüş bir çözümü olmamakla birlikte araştırmacılar kendi projelerine uygun optimum çözümleri geliştirmek için yoğun biçimde çalışmaktadırlar. SLAM sorunsalına bir yaklaşım da Geomatik Mühendisliği çalışma tarzıyla geliştirilebilir. Algılayıcı gürültülerine ve lineer olmayan durumlara karşı dayanıklı (*robust*) ve hesaplama verimliliği yüksek bir grafik tabanlı (*graph-based*) SLAM yaklaşımı uygulanabilmektedir. Öncelikle doğru ve güvenilir harita üretim probleminin istatistiksel açıdan lineer olmayan bir optimizasyon problemi olduğu kabul edilir ve harita üretimi en büyük olasılıklı olabirlik kestirimi (*maximum likelihood*) ile gerçekleştirilebilir. Harita üretimini temel olacak konum bilgileri de konum/detay grafiğinden (*pose/feature graph*) elde edilebilir. Konum/detay grafiğinin düğümlerinin (*node*) konumları çevrim kapanmalarındaki (*loop closing*) kısıtlamalarda en küçük hata oluşacak şekilde kestirilir. (Güney 2016)

Geliştirilmekte olan 'GeoRoSS'un amacı öncelikle yer altı madenlerinin 3B dijital mekansal modellerini üretmektir. Bunun için 3B lazer tarama teknolojisi ile üretilen nokta bulutları kullanılmaktadır. Farklı nokta bulutlarının çakıştırılmasında diğer duyargalar tarafından üretilmiş olan navigasyon bilgileri kullanılmaktadır. Nokta bulutlarının tek bir koordinat sistemi içerisinde birleştirilmesi yer altı ortamının 3B haritasının üretilmesinde geometrik altlığı oluşturmaktadır.

ROS ile uyumlu olan "Point Cloud Library (PCL)" nokta bulutuna ilişkin algoritmalar ve kütüphaneleri sağlamaktadır. Bu kütüphanelerle filtreleme, nokta bulutu çakıştırma (*registration*), detay yakalama (*feature detection*) yapılabilmektedir (URL 1). 3B görüntü işleme kütüphanesi olan PCL C++ diliyle geliştirilmiştir ve Berkeley Software Distribution (BSD) lisansı ile açık kaynak kodludur.

Elde edilen yüksek çözünürlüklü 3B nokta bulutu verilerinin birleştirilmesinden (*ground-truth data set*) sonra insanlar için erişimi zor veya riskli ortamlar hakkında boyut, hacim ve topoğrafya gibi mekansal bilgiler, modeller ve yer altı haritaları üretilebilmekte ve yer altı ortamlarının 3B geometrisi sanal ortamda karar-vericilerin kullanımı için oluşturulabilmektedir. Birleştirilen nokta bulutlarından oluşturulan 3B modeller üzerinden doğrudan ölçme yapılabilmekte, mesafe ölçülebilmekte, kesitler alınabilmekte, alan ve hacim hesaplamaları gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca 3B modeller tavan yüksekliklerinin belirlenmesi ya da madenden çıkarılan maddelerin miktarlarının hesabında kullanılacak ölçüler gibi 2B harita üzerinde yapılması mümkün olmayan ölçülerin de gerçekleştirilmesini olanaklı hale getirmektedir.

Yer altı madencilğinde üretimin kesilmeden devam edebilmesi ve iş güvenliğinin sağlanabilmesi için önemli konulardan biri de tahkimat işidir. Tahkimat deformasyonunun ve emniyet gerilmelerinin izlenmesi yer altı çalışmalarında önemli bir yer tutmakta ve yapılması zaman ve emek gerektirmektedir (Aksoy ve Onargan 2012). Tahkimatların sürekli ve dinamik olarak otomatik biçimde ölçülmesi ve deformasyonlarının 3B modeller üzerinden belirlenebilmesi maden işletmeleri açısından çok önemlidir (IMCET, 2005).

Tahkimat davranışlarının beklenen modeli izleyip izlemediğinin kontrolü yer altı maden ocağının üretilen 3B modeli üzerinde tahkimat sistemlerinin farklı zamanlarda yapılan 3B taramaları arasındaki geometrik değişimler izlenerek gerçekleştirilebilir.

Isıl görüntüleyicinin lazer tarama cihazı ile birlikte eş zamanlı çalışması nokta bulutlarının yanı sıra ortamda bulunan yüzey sıcaklıklarına göre oluşan kızılötesi ışımandan termografik görselleştirilmeler gerçekleştirilerek önemli bilgilerin ortaya çıkmasını sağlamaktadır.

Tekerlekli bir robot üzerinde bulunan sözü edilen farklı tür algılayıcılardan elde edilen değişik türdeki veriler tek bir global jeodezik koordinat sisteminde yer altı ortamlarının yüksek çözünürlüklü geometrik modeli ile bütünleştirilmekte ve jeolojik ve/veya yapay detaylar (*natural and man-made geologic features*) GIS ortamında kullanılmak üzere detay bilgisi (*feature-based*) biçiminde bir mekansal veritabanında (*spatial database, geodatabase*) uygun mekansal veri yapıları kullanılarak depolanmaktadır. Böylece maden işletmecileri, maden mühendisleri gibi farklı düzeydeki kullanıcılar Mekansal Bilgi Sisteminde üretilen bu çok fonksiyonlu modeli karar-destek süreçlerinde kullanabileceklerdir. Yüksek çözünürlüklü yüzey modelleri (*high-resolution surface models*) üzerinde yük gerilimi ve deformasyon gibi mekansal analizler

gerçekleştirilebilecek, yüzey modelleri termal görüntülerle kaplanabilecek (*rendering*) ve jeolojik sorgulamalar yapılabilecektir.

### 3. Sonuç ve Öneriler

Yeni nesil madencilik anlayışına uygun olarak madencilik sektöründe insansız üretim ve uzaktan kumandalı üretim yaklaşımına dayalı ‘GeoRoSS’ gibi akıllı sistemlerin (*intelligent systems, autonomous systems*) kullanımı ile işçi sağlığı ve iş güvenliğinde çok büyük oranda iyileştirme sağlanabilir, emniyetli/güvenli bir çalışma ortamı oluşturulabilir, üretim arttırılabilir, işletme maliyetleri düşürülebilir, iş kazalarından kaynaklanan harcamalar azaltılabilir, emek yoğun işlerin daha hızlı tamamlanmasını sağlanabilir ve maden cevherinin verimli bir biçimde üretilmesine katkı verilebilir.

‘GeoRoSS’un amacı yer altı maden ocaklarının fiziksel durumlarını dijital ortamda tekrar oluşturmak ve zaman içerisindeki deformasyonları sanal maden üzerinde izleyebilmek ve riskli alanları maden mühendisleriyle paylaşarak çökme olmadan önce önlem alınabilmesini sağlayabilmektir.

Madencilik faaliyetleri, genelde şartları sürekli değişkenlik ve belirsizlik gösteren jeolojik ortamlarda sürdürülmektedir. Madencilik sistemlerinin, otomatik olarak işleyen yapılardan çok bu belirsizlikleri fark edip üstesinden gelebilecek, dayanıklı, aynı zamanda değişken düşünebilme yeteneğine sahip “akıllı/otonom madencilik sistemleri” olmaları gerekmektedir. (Güney vd., 2015a) Sözü edilen bu yetenek ‘GeoRoSS’ gibi robotik sistemlere makine öğrenmesi (*machine learning, deep learning*) ve yapay zeka (*artificial intelligence*) desteğinin sağlanması ile gerçekleştirilebilir. Yapay zeka alanındaki sağduyu/hayat bilgisi (*common-sense knowledge*) ile nesne sınıflandırmasının kullanılabilmesi semantik haritalar çalışma kapsamında ifade edilen görevlerin daha etkin şekilde yerine getirilmesini sağlayacaktır. (Güney 2016)

Günümüzde bilgisayar, cep telefonu gibi teknolojik ürünlerin üretiminde kullanılan değerli maden kaynaklarının hızla tükeniyor olması nedeniyle bu tür malzemelerin Ay ve/veya asterooidlerden temin edilmesine yönelik olarak uzay madenciliği çalışmalarını başlatmış ve bu çalışmalar gelişmiş ülkelerin özel sektörleri tarafından yoğun bir şekilde sürdürülmektedir. Bu nedenle ‘GeoRoSS’ vb. otonom madencilik sistemlerine yakın gelecekte yeryuvarı dışında da gereksinim duyulacaktır.

### Teşekkür

Bu çalışma T.C. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Sanayi Tezleri Programının 0548.STZ.2013-2 kodlu SAN-TEZ projesi, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu TÜBİTAK 115Y354 projesi ve İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi ile Solvotek Mühendislik ve Bilişim Hizmetleri tarafından desteklenmektedir. Projeye ilgili detaylı bilgi <http://www.geo.itu.edu.tr/geoross/> adresinde bulunmaktadır.

### Kaynaklar

- Aksoy, C. O., Onargan, T., 2012, Yeraltı Yapıları ve Tahkimat Tasarımı, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
- Güney, C., Sayın, S.B., Sayın, B., 2015a, Madencilik Ölçmelerinde Robotik Bir Yaklaşım: “GeoRoSS”, *TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, 15. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, 25-28 Mart, Ankara.
- Güney, C., Sayın, S.B., Sanel, S., 2015b, Madencilik Sektöründe Robotik Ölçme Sistemi ile 3B Haritaların Üretimi, *Türkiye Robotbilim Konferansı - ToRK2015*, 26-27 Ekim, İstanbul.
- Güney, C., Sayın, S.B., 2016, Jeodezik Ölçme Ve Mekansal Karar Destek İçin Robotik Bir Yaklaşım, *XVIII. Akademik Bilişim Konferansı -AB2016*, Adnan Menderes Üniversitesi, 30 Ocak - 5 Şubat, Aydın.
- Güney, C., 2016, Gezgin Robotların Lokalden Globale Geçebilmesi için Geomatik, *Türkiye Robotbilim Konferansı - ToRK2016*, 2-3 Kasım, İstanbul
- IMCET (2005), Tahkimat, Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi. ISBN 975-395-880-3.
- Smith, R., Self, M. and Cheeseman, A., 1987, A Stochastic Map For Uncertain Spatial Relationships, *Fourth International Symposium of Robotics Research*, 467-474
- URL 1, Point Cloud Library web sayfası, [www.pointclouds.org](http://www.pointclouds.org)