

Madencilik Ölçmelerinde Robotik Bir Yaklaşım: “GeoRoSS”

Caner Güney^{1*}, Serdar Bora Sayın², Banu Sayın³

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, 34469, İstanbul.

² İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Geomatik Mühendisliği Anabilim Dalı, 34469, İstanbul.

³ Solvotek Mühendislik ve Bilişim Hizmetleri, 34430, İstanbul.

Özet

Yer altında madencilik ölçmeleri ve maden haritaları üretim işi son derece karmaşık, zor ve riskli bir iştir. Geomatik Mühendisleri gereksinim duyulan bu ölçmeleri gerçekleştirmek için büyük riskler almak zorunda kalmakta ve bu nedenle çoğu zaman birçok tehlikeyle karşılaşmaktadır. Bu bildiri kapsamında çalışma şartları bakımından ağır iş kollarından biri olan yer altı madencilik uygulamalarında, iş sağlığı ve güvenliğinin sağlanmasının yanında üretkenliği ve verimliliği arttıracak mobil bir “Robotik Ölçme Sistemi (Geo-enable Robotic Surveying System: GeoRoSS)”nin nasıl tasarlandığı, madencilik faaliyetlerinde üretkenliğin ve verimliliğin nasıl artacağı ve Türkiye’de sıklıkla yaşanan Soma faciası benzeri diğer kazaların tekrar yaşanmaması için neler yapılabileceği açıklanacaktır. Mobil bir ölçme platformu üzerine 3B lazer tarama cihazı ve diğer çok amaçlı veri toplayabilen duyguların (algılayıcı-sensor) yerleştirildiği ROS tabanlı bir ölçme sistemi olan ‘GeoRoSS’, jeodezik ölçme çalışmalarını daha presizyonlu, doğru, güvenli, hızlı ve ekonomik bir biçimde gerçekleştirebilmesini sağlamaktadır. Böylece en kötü emniyet koşullarına sahip madencilik sektöründe “insansız üretim” ve “uzaktan kumandalı üretim” yaklaşımı sayesinde işçi sağlığı ve iş güveliğinde çok büyük oranda iyileştirme sağlanırken üretim de arttırılacak ve işletme maliyetleri ile iş kazalarından kaynaklanan harcamalarda azalacaktır.

Anahtar Sözcükler

Madencilik Ölçmeleri, Lazer Tarama, Navigasyon, İnsansız Yer Aracı, Robotik Ölçme, İş Güvenliği

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 bunun sürdürülebilirliğinin sağlanmasının 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.

Yer altında madencilik ölçmeleri ve maden haritaları üretim işi son derece karmaşık, zor ve riskli bir iştir. Geomatik Mühendisleri gereksinim duyulan bu ölçmeleri gerçekleştirmek için büyük riskler almak zorunda kalmakta ve bu nedenle çoğu zaman birçok tehlikeyle karşılaşmaktadır. Çalışma şartları bakımından en ağır iş kolu olan yer altı madencilik uygulamalarında, üretkenliği ve verimliliği arttıracak, aynı zamanda riskli yer altı maden ortamlarında ölçme uzmanı/operatör bulundurma gereksinimini ortadan kaldıracak, uzaktan kontrol edilebilen ve/veya otonom hareket edebilen robotik ölçme sistemlerine gereksinim bulunmaktadır. Hareketli bir platform üzerinde 3 boyutlu (3B) ve 2 boyutlu lazer tarama cihazlarının bulunduğu sözü edilen robotik sistem tasarlanmış ve geliştirilmeye başlanmıştır.

T.C. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Sanayi Tezleri Programının 0548.STZ.2013-2 kodlu SAN-TEZ projesi kapsamında İstanbul Teknik Üniversitesi ile Solvotek Mühendislik ve Bilişim Hizmetleri tarafından bir Araştırma-Geliştirme (Ar-Ge) ürünü olarak “Robotik Ölçme Sistemi (Geo-enable Robotic Surveying System, GeoRoSS)” geliştirilmektedir (<http://www.geo.itu.edu.tr/geoross/>). Üniversite sanayi işbirliğine güzel bir örnek olan ‘GeoRoSS’ yeraltı ortamlarında etkin ve verimli olarak kullanılabilmesi için çok amaçlı veri toplayabilen ve bu verileri birleştirebilen (*data fusion*) duygara (*sensor/geosensor*) tabanlı bir ölçme ve izleme sistemi oluşturulmaya çalışılmaktadır. Bu sistemle yer altı ortamlarında bulunan farklı tür madenlere erişilmesi, jeodezik ölçme kalitesindeki verilerin elde edilmesi ve değerlendirilmesi, modellenmesi, mekansal analiz ve karar-destek aşamasında kullanılması gerçekleştirilmeye çalışılmaktadır. ‘GeoRoSS’ yeraltı maden ortamlarının yanı sıra operatörlü ölçme yapmanın zor olduğu ve hayati tehlike arz eden göçük, heyelan ve deprem yıkıntıları gibi ortamlarda da kullanılabilir olacak biçimde geliştirilmektedir.

İş sağlığı ve güvenliğinin gittikçe daha önemli hale geldiği 21. yüzyılda riskli alanlarda jeodezik ölçme çalışmalarını daha presizyonlu, doğru, güvenli, hızlı ve ekonomik bir biçimde gerçekleştirebilmek için robotik araç üzerine bir 3B lazer tarama cihazı entegre edilerek uzaktan kontrollü veya kendi başına hareket edebilen ve çok amaçlı veri toplayabilen duygara (*sensor*) tabanlı bir ölçme sistemi tasarlanıp geliştirilmektedir. Böylece en kötü emniyet koşullarına sahip madencilik sektöründe *insansız üretim* ve *uzaktan kumandalı üretim* yaklaşımı sayesinde işçi sağlığı ve iş güveliğinde çok büyük oranda iyileştirme sağlanırken üretim de arttırılacak ve işletme maliyetleri ile iş kazalarından kaynaklanan harcamalarda azalacaktır.

* Sorumlu Yazar: Tel: +90 (212) 285 3825 Faks: +90 (212) 285 6587

E-posta: guneycan@itu.edu.tr (Güney, C.), bora.sayin@gmail.com (Sayın, S.B.), banu.sayin@solvo-tek.com (Sayın, B.)

2. Yeni Nesil Madencilik Anlayışı

21. yüzyılda diğer sektörlerde olduğu gibi madencilik sektöründe de sürdürülebilirliğin temelini “*Triple Bottom Line*” olarak bilinen üçlü kazanç sistemi oluşturmaktadır. Sistemin sacayakları “üretimden elde edilecek kâr”, “iş güvenliği/işçi sağlığı”, ve “çevrenin/ekolojinin korunması” olup bunların her biri birbirine eş değerdir. Kâr amacıyla iş güvenliği, işçi sağlığı ve çevre geri plana atılamaz, eğer atılıyorsa o işletme kapatılmalıdır. Dünyanın en büyük 17. ve Avrupa’nın 6. en büyük ekonomisi olan, 2023 yılında dünyada en büyük 10 ekonomi arasına girmeyi hedefleyen Türkiye Cumhuriyeti (T.C.)’nin iş kazaları ve işçi ölümlerinde Avrupa’da birinci ve dünyada ise üçüncü olması çelişkili bir durum ortaya çıkarmakta ve özellikle madencilik ve tünelcilik faaliyetlerinde sürdürülebilir gelişimi engellemektedir.

T.C. Hükümetleri tarafından yapılan açıklamalarda Türkiye gibi bir ülkenin, elektrik enerjisi gereksinimini yerli kaynaklarla özellikle de kömür kullanımıyla karşılamasının stratejik bir önem kazandığı, bu nedenle Türkiye’de kömür madenlerinin işletilmesinin durdurulamayacağı ve kömür madenlerinin ekonomiye kazandırılmak durumunda olduğu sıklıkla ifade edilmektedir. Ayrıca, medeniyetin ve teknolojinin madencilğe bağlı olduğu da bilinmektedir. Bu yüzden Türkiye’de sürdürülebilir madencilik ilkeleri doğrultusunda, maden kazalarını önleyici tedbirlerin alındığı, modern üretim, kontrol ve izleme tekniklerinin ve teknolojilerinin kullanıldığı yeni nesil madencilik anlayışına geçilmek durumundadır. Soma faciasında 301 madencinin yaşamını yitirmesi maden kazaları için bir milat olmuş; siyasiler, bürokratlar, medya ile birlikte diğer tüm kamuoyu bileşenleri gözlerini madencilik faaliyetlerine ilişkin yapılacak yeni araştırma-geliştirme çalışmalarına ve akıllı yeraltı (madencilik/tünelcilik) teknolojilerinin bu çalışmalarda etkin kullanımına çevirmiş bulunmaktadır.

Bu bildiride sözü edilen proje kapsamında geliştirilmekte olan ‘*GeoRoSS*’ her madenin mekansal modellenmesi ve deformasyonların izlenmesi için önemli bir çalışma olacak ve çok değerli mekansal altlıkların üretilmesini sağlayacaktır. Bu altlıklar gerek maden kazalarının yaşanmaması için gerekse kazalar olduğunda arama-kurtarma faaliyetlerinin planlanmasında kullanılabilecektir. Doğru ya da güncel olmayan bir harita madende çalışanların çökme riskli olan alanlarda bulunmasına, madende su dolu bir bölgeye doğru yönlendirmelerine neden olabilir ve bunun sonucunda tehlikeli alanlarda mahsur kalma durumu ortaya çıkabilmektedir.

3. Mars’ta ve Soma’da Bulunan İki Farklı Metan

Gelişmiş ülkelerin uzay araştırmalarına gösterdikleri ilgi son dönemde önemli düzeyde artış göstermektedir. Bu çalışmalara örnek olarak “Amerikan Uzay ve Havacılık Dairesi (*National Aeronautics and Space Administration*, NASA)”nın Mars gezegenine gönderdiği ‘*Curiosity*’ keşif aracı, Plüton gezegenine gönderdiği ‘*The New Horizons*’ uzay sondası, “Avrupa Uzay Ajansı (*European Space Agency*, ESA)”nın ‘*Rosetta*’ uzay sondasının 67P/Çuryumov-Gerasimenko kuyruklu yıldızına 10 yılda ulaşması ve ‘*Philae*’ isimli modülü araştırma yapmak için indirmesi, NASA’nın ‘*Oriion*’ uzay kapsülü ile Mars gezegenine yapılacak yolculuğun başlatılmış olması, yine NASA’nın ‘*Cassini*’ görevinde Satürn gezegeni uydularından Mimas’ın yüzeyinin altında dev bir okyanus barındırıyor olabileceği olasılığının ortaya çıkması vb. gösterilebilir.

NASA’nın 2012 yılında Mars gezegenine ulaşan ‘*Curiosity*’ keşif aracının Mars atmosferinde yüksek derecede metan gazı izlerini tespit etmesi bilim dünyasında farklı tartışmaların ortaya çıkmasına neden olmuştur. Yüksek değerde tespit edilen metan gazının kökenlerinin jeolojik ya da biyolojik olup olmadığı anlaşılmaya çalışılmaktadır. İster jeolojik ister biyolojik olsun tespit edilen metan gazı Mars gezegeninin canlı olduğunu göstermektedir. Ortaya çıkan bu durum ESA ve “Rusya Federasyonu Uzay Ajansı (Roscosmos)”nın birlikte gerçekleştirdikleri ‘*ExoMars*’ görevinden elde edilecek bilgilerle daha da aydınlanacağı düşünülmektedir.

2015 yılından itibaren özel sektör tarafından uzay madenciliği için asteroidlere maden arama robotları gönderilmeye başlanması planlanmaktadır. Asteroidlerin büyük çoğunda su, nikel ve metan gazı olduğu düşünülmektedir. Yeryuvarının etrafında binlerce asteroid olduğu düşünüldüğünde büyük ve önemli bir metan kaynağı oluşmaktadır.

Türkiye Büyük Millet Meclisi’nde Soma maden kazasının incelenmesi için kurulan Meclis Araştırma Komisyonu’nun 301 madencinin ölümüyle ilgili hazırladığı raporda facianın çökme sonucu galeriye dolan metan gazının yanmasıyla meydana geldiği ifade edilmiştir.

Nasıl bir çelişkidir ki Mars’ta tespit edilen metan gazı artışı Dünya dışında yaşam için bir umut olurken (Mars’a ya da diğer gezegenlere yerleşme) diğer taraftan Türkiye’deki madenlerde sıklıkla duyduğumuz metan gazı (grizu) patlayıp yanarak yüzlerce insanın ölümüne neden olmaktadır.

4. Çok Fonksiyonlu Robotik Ölçme ve İzleme Sistemi

İçinde bulunulan bilişim çağında robotların insan hayatındaki yeri ve önemi giderek artmaktadır. Robotların insan yaşamını daha rahat, daha etkin ve daha verimli hale getirmeyi hedefleyen temel ve uygulamalı robot araştırmaları da tüm dünyada yaygınlaşmaktadır. Robotik sistemlerin insanlarla karşılaştırıldığında üstün tarafları; üretim artışı, üretim maliyetinin düşmesi, kalite artışı, tehlikeli ortamlarda çalışabilme, yönetim-denetim kolaylığı, iş esnekliği, uzun ömür,

dayanıklılık, 7/24 çalışabilme vb. olup çoğunlukla insanların girmesinin tehlikeli ve riskli olduğu ortamlarda yapılması gereken işlerde robot teknolojisi kullanılmaktadır.

Yer altı madenciliği diğer uygulama alanlarına göre daha tehlikeli ve verimsiz işletme şartlarına sahip olduğu için robotik çalışmalar bu uygulama alanı için iş güvenliğinin sağlanması ve üretkenliğin artırılması konularında önemli bir yere sahiptir. Diğer taraftan robot teknolojisi Türkiye’de maden işletmecilerinin ilgisini pek çekmeyi başaramamış ve kendisine yaygın bir uygulama alanı bulamamıştır.

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.

Yer üstünde (*Autonomous Ground Vehicle*, AGV) ve havada (*Unmanned Aerial Vehicle*, UAV veya *Drones*) benzer robotik ölçme sistemleri (*autonomous vehicles*) geliştirilmektedir. Bugün yaygın olarak kent içinde yapı yüzlerinin taranması için kullanılmaya başlanmış olan 3B tarayıcıların araç üzerine entegre edildiği mobil ölçme sistemleri hızlı veri toplama kabiliyetine sahip olmasına rağmen, ancak sürücü ve operatörden oluşan bir ekip tarafından kullanılabilir. Ayrıca yer üstünde kullanılan ölçme sistemleri geniş boyutları, yükseklikleri ve sınırlı hareket kabiliyeti yüzünden bu çalışmanın konusu olan yer altı ortamlarındaki riskli alanlarda kullanılması olası değildir. Bu nedenle yer altı ortamlarında mobil bir sistemin hareketinin operatörsüz sağlanması ve navigasyon parametrelerinin otomatik olarak belirlenmesi yer altı çalışma koşullarının zorluğu da dikkate alındığında basit bir konu olmadığı açıktır. Öyle ki, zorlu yer altı koşullarında algılayıcıların ve navigasyon sistemlerinin nasıl davranacağı konusunda literatürde de detaylı bir bilgi bulunmamaktadır.

‘GeoRoSS’ yer altı ortamlarının ölçülmesine, modellenmesine ve araştırmasına uygun farklı duyarğa türleriyle donatılan robotik bir ölçme sistemidir. Sistemde bulunacak duyarğa türleri aşağıda ifade edilmektedir:

1. Navigasyon Duyargaları (*odometry sensors*)
 - 1.1. Global Konum Belirleme Sistemi (*Global Positioning System*, *GPS/GNSS*) alıcısı (*receiver*)
4B konum bilgisi (3B+ zaman) üretmek için kullanılan GNSS/GPS Alıcısı
 - 1.2. 2B lazer mesafe bulucu (*laser rangefinder*)
5-80 metre gibi kısa ve orta mesafelerde etkili olan ve mobil platformun rotası üzerindeki engelleri belirlemede ve yön bulmada kullanılacak “time-of-flight” yöntemi ile çalışan 2B lazer tarayıcı
 - 1.3. 9DOF İnertiyel Navigasyon Sistemi (*Inertial Navigation System*, *INS*)
İçerdiği ivmeölçer (*accelerometer*), jiroskop (*gyroscope*), manyetometre (*magnetometer*), manyetik sapması bilinen pusula (*compass*), inklinometre gibi alt sensörler sayesinde bağlı olduğu objenin hız (ivme), yöneltme ve konum bilgilerini elde eden sistem. Navigasyon bilgilerinden yaw/pitch/roll eksen dönüklükleri INS tarafından yöneltme (*orientation*) bilgisi olarak sağlanmaktadır.
2. Jeodezik Ölçme Duyargaları
 - 2.1. 3B Yersel Lazer Tarayıcı (*Terrestrial Laser Scanner*, *TLS*)
Üç boyutlu mesafe ölçümü yaparak yüksek görüş açısı ile uzun mesafe tarama bilgisini nokta bulutu olarak sağlayan faz-bazlı (*phase-based*) çalışan tarama platformu
 - 2.2. GPS/GNSS Alıcısı
3. Ortam Duyargaları (Çevre Algılayıcı Duyargalar) ve Diğer Duyargalar
 - 3.1. Isıl Görüntüleyici (*Thermal Imaging Camera*)
Yer altı ortamlarında bulunan jeolojik ve yapay detayların kızıl ötesi ışınımında (*infrared electromagnetic energy*) ısı görüntülenmesi için kullanılacak kamera
 - 3.2. Portatif Çoklu Gaz Detektörü (*Portable Multigas Detector*)
Metan, karbonmonoksit, karbondioksit gibi tehlikeli gazları yakalayabilecek, oksijen konsantrasyonunu izleyebilecek, sıcaklık, nem, basınç gibi parametreleri ölçebilecek bir elektrokimyasal algılayıcı
 - 3.3. Kablosuz haberleşme (*two-way radio*)
Kablosuz iletişim için gerekli Radyo Frekansı (*Radio Frequency*, *RF*) modülleri, modem

Proje kapsamında insansız yer aracı (*Unmanned Ground Vehicle*, UGV) olarak *Clearpath* firması tarafından üretilen *Husky A200*, 2B lazer mesafe bulucu olarak *SICK* firmasının *LMS511 PRO* cihazı ve TLS olarak *Zoller+Fröhlich* firmasının *Imager 5010* tarayıcısı kullanılmaktadır. ‘GeoRoSS’un işlemci gücünü *Toshiba Protege M200* dizüstü bilgisayar oluşturmaktadır. ‘GeoRoSS’ üzerinde bulunan duyargalardan gelen veriler dizüstü bilgisayarda *Linux Ubuntu 12.0.4 LTS* işletim sisteminde çalışan “*Robotic Operating System* (ROS)” platformunun *Indigo* sürümü üzerinde birleştirilmektedir.

İnsanlarla karşılaştırıldığında sınırlı da olsa robotların en önemli özelliklerinden biri içinde bulundukları ortamı sahip oldukları duyarğalar sayesinde yorumlayıp nasıl tepki vereceklerini karar verebilmeleridir (Schulz 2013). Bu sayede

robotlar içinde bulundukları ortamla etkileşime geçebilmektedir. Sözü edilen durumun gerçekleşebilmesi için robotların içinde hareket ettikleri ortamı tanımları/keşfetmeleri (*mapping*), bu ortam içerisinde kendi konumlarının neresi olduğunu (*pose*) bilmeleri, tüm bu bilgilere göre hareket güzergahlarını/gezintilerini (*trajectory*) belirlemeleri/planlamaları (Durrant ve Bailey 2006) ve güzergahlarında bulunan statik ve dinamik engellerden sakınabilmeleri gerekmektedir. Bu durumda robot tarafından yapılması gereken ilk iş kendi navigasyonu için ortamın haritasını üretmesidir.

'GeoRoSS' üzerindeki navigasyon duyargaları (*range and inertia sensors*) kullanılarak robotun konum ve duruş kestirimi (*robot pose estimation*) yapılmakta ve hareket güzergahının/gezintisinin 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. 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.

Robotik Algılama süreci çevre bilgisinin kısmen gözlemlenebilmesi ve sıklıkla değişmesinden dolayı zordur. Yer altı madenlerinde robotik sistemlerde karşılaşılan en büyük zorluklardan biri çevre koşullarıdır. Yapılan üretime ve maden şartlarına bağlı olarak yollar ile çevre değişkendir. Proje kapsamında mobil robotik ölçme sisteminin içerisinde bulunduğu çevreyle arasındaki ilişkiyi sağlayan duyargaların ve yönlendiricilerin, robotik sistemin konumunun belirlenmesinde ve hareketlerinin planlanmasında kullanılması üzerinde çalışılmaktadır.

Mobil Robotik Ölçme Sistemi'nin yer altı madencilik uygulamalarında kullanılabilmesi için çözülmesi gereken en temel sorun "Global Konum Belirleme Sistemi (*Global Positioning System, GPS/GNSS*)" verisi olmayacağı için mobil platform üzerindeki diğer duyargaların doğru konum ve oriyantasyon bilgilerini üretmesi ve bunun devamlılığının sağlanabilmesidir.

Güvenilir olmadığı için tekerlek odometrisi, çözünürlükleri yetmediği ve performansları düşük olduğu için kızılötesi, ultrasonic, sonar vb. duyargalar kullanılmamaktadır. Yer altı ortamlarında ışığın az ya da hiç bulunmaması nedeniyle RGB-D, Kinect gibi görsel odometri (optik algılayıcılar) de kullanılmamaktadır. Çalışma kapsamında odometri bilgisi lazer mesafe bulucu ve INS duyargaları ile üretilmektedir.

2B lazer mesafe bulucu/ölçücü (*laser rangefinder*) ve atalet/eylemsizlik (*Inertial Measurement Unit, IMU*) duyargalarından elde edilen 'odometrik veriler', SLAM algoritması içerisinde birleştirilir ve ortamın navigasyon amaçlı (*robot trajectory and pose estimation*) 2B haritası üretilmektedir. Sözü edilen duyargalardan elde edilen verilerde bulunan gürültülerin (*noise*) elimine edilmesinde/filtrelenmesinde farklı yöntemler kullanılabilmektedir. Bunlara örnek olarak Kalman Filtrelemesi, Genişletilmiş Kalman Filtrelemesi (*Extended Kalman Filter*), Monte Carlo Konumlaması (*Monte Carlo Localization*), Markov Konumlaması, Rao-Blackwellized Kısmi Filtrelemesi vb. gösterilebilir (Montemerlo vd. 2002; Haehnel vd. 2003; Montemerlo vd. 2003; Grisetti vd. 2005; Eliazar ve Parr, 2003). Proje kapsamında "GeoRoSS"un odometrik performansı son derece önemlidir. Çünkü bu performans doğrudan yüksek çözünürlüklü nokta bulutlarının çakıştırılmasındaki (*registration*) doğruluğu etkilemektedir.

GPS alıcısı ile 'GeoRoSS'un konumu dünya üzerinde "World Geodetic System (WGS84)" koordinat sisteminde (jeodezik datumda) 3B olarak belirlenmektedir. Bundan sonra yapılacak tüm ölçmeler bu koordinat sistemi üzerinde tanımlanmaktadır. "GeoRoSS"un madende yalnız başlangıç konumu belirli olup hedef konumu belirsizdir. Bu nedenle ortamın haritasını üretmek için de SLAM yöntemlerinden olan ve ROS platformunda kullanılabilen "*gridMapping*" (*gMapping*), "*hectorMapping*" gibi algoritmalar kullanılmaktadır.

TLS cihazı ile elde edilecek nokta bulutlarından 3 boyutlu modellemenin yapılmasındaki kritik nokta çoklu 3 boyutlu görüşlerin (*multiple 3D views*) yüksek doğrulukla çakıştırılabilmesidir. Her bir tarama kendi koordinat sisteminde olmasına karşın tüm taramaların tek bir koordinat sisteminde birleştirilebilir olması gerekmektedir. Farklı tarama noktalarından yapılan taramalardan elde edilen nokta bulutlarının ilişkilendirilmesinde *multi-view surface matching*, "*Iterative Closest Point (ICP)*" gibi algoritmalar kullanılmaktadır. (Kaushik vd. 2009; Previtali vd. 2014; Hebel ve Stilla 2007; Elseberg vd. 2011)

ROS platformu; C++ kütüphaneleri olan OpenCV, Point Cloud Library, Qt, 3D Object-Oriented Graphics Rendering Engine, Mobile Robot Programming Toolkit gibi robotik orta katman uygulamaları (*middleware applications*) ile uyumlu çalışabilmektedir. ROS ile uyumlu bir şekilde çalışan "*Open Source Computer Vision (OpenCV)*" kütüphaneleri, algoritmaları ve araçları bu proje kapsamında görsel bir kamera sistemde bulunmadığı için kullanılamamaktadır. Onun yerine yine ROS ile uyumlu olan "*Point Cloud Library (PCL)*" kullanılmaktadır. PCL nokta bulutuna ilişkin algoritmalar ve kütüphaneleri sağlamaktadır. Bu kütüphanelerle filtreleme, nokta bulutu çakıştırma (*registraion*), detay yakalama (*feature detection*) yapılabilmektedir.

Yeraltı ortamında 3B lazer tarayıcı elde edilen yüksek boyutlu nokta bulutu verileri "*LASer (LAS)*" formatında saklanmakta ve "*Light Form Modeler (LFM)*" yazılımında değerlendirilmekte ve CAD ya da CBS ortamına aktarılabilir.

Elde edilen yüksek çözünürlüklü 3B nokta bulutu verilerinin birleştirilmesinden (*registration*) sonra insanlar için erişimi zor veya riskli ortamlar hakkında boyut, hacim ve halihazır gibi mekansal bilgiler, modeller ve yer altı haritaları üretilebilir ve yer altı ortamlarının 3B geometrisi sanal ortamda karar-vericilerin kullanımı için oluşturulabilir. Birleştirilen nokta bulutlarının görselleştirilmesiyle oluşturulan 3B model üzerinden doğrudan ölçme yapılabilir, mesafe ölçülebilir, kesitler alınabilir, alan ve hacim hesaplamaları gerçekleştirilebilir. Ayrıca 3 boyutlu modeller tavan yüksekliklerinin belirlenmesi ya da madenden çıkarılan maddelerin miktarlarının hesabında kullanılacak ölçüler gibi 2B çizgisel harita üzerinde yapılması mümkün olmayan ölçülerin de gerçekleştirilmesini olanaklı kılacaktır.

Isıl görüntüleyicinin lazer tarama cihazı ile birlikte eş zamanlı çalışması nokta bulutlarının yanı sıra ortamda bulunan yüzey sıcaklıklarına göre oluşan kızılötesi ışıınımdan termografik görselleştirilmeler gerçekleştirilerek önemli bilgilerin ortaya çıkmasını sağlayacaktır. Yer altı ortamları aydınlık ortamlar olmaması ve ortamda toz ve su partiküllerinin yoğun bulunması görünür ışıktaki çalışan kameraların yer altı madenlerinde etkin biçimde kullanılmasını engeller, bu nedenle proje konusu uygulamada elektromanyetik dalgalarla ışıyan enerjinin algılanıp ölçüldüğü ısı görüntüleme yöntemi tercih edilmektedir. Isıl görüntüleme (*thermal imaging*) tekniğiyle oluşturulan görüntüler (*thermogram*) cevher ortamında bulunan jeolojik ve yapay detayları çıkarma (*material detection*), cevher sınırları belirleme gibi farklı uygulamalarda ve örüntü yakalama amacı ile kullanılabilir. Toprak, kayaç, cevher ve diğer detaylarda bulunabilecek anomaliler tespit edilebilir ve böylece yapılacak hızlı analizler ile karar-destek sürecinde kullanılacak mekansal altlıklı yer altı maden termografisi oluşturulabilir. Proje kapsamında TLS cihazı ile bir koordinat sisteminde üretilen vektör yapısındaki 3B nokta bulutu verileri, cisimlerin ısılarına göre yayılan kızıl ötesi ışınlarla oluşturulan görüntülerle birleştirilmeye/kaplanmaya (*rendering*) çalışılmaktadır. Böylece madenin 3B ısı haritası (*3D thermal map*) üretilmiş olacaktır. (Borrmann vd. 2012; Rangel vd. 2014; Vidas vd. 2013)

Proje kapsamında yapılan diğer bir izleme maden içinde hava kontrolünün yapılması bir diğer ifadeyle temiz havanın ve gaz durumunun izlenmesidir. Hava Kontrolü, işyerine gerekli miktarda hava verildiğinin, hava hızının, sıcaklığının ve rutubetinin istenilen sınırlar içinde bulunduğunu, tehlikeli gazların ve tozun tehlike sınırları altında kaldığını saptamak için yapılır. Madenlerde temiz hava sağlanamamasından dolayı üretimin kesintiye uğraması, komple durması ve çalışanların can güvenliğinin tehlikeye girmesi karşılaşılan ana problemlerdendir. Yer altı maden ocaklarında havanın geçiş yapabileceği her bir boşluğa, örneğin kuyu, galeri, taban yolu, ayak ve benzeri kısımlara, yeteri kadar temiz havanın iletiliyor olması çok kritiktir. Tüm bu boşluklara sağlanan temiz havanın kontrol altında tutulması, ortaya çıktığı durumlarda patlayıcı gazların konsantrasyonunu bilinmesi, çalışanlar için uygun, güvenli ve kaliteli bir solunum havası sağlanması, gerektiği durumlarda yanma için olmazsa olmaz madde olan oksijenin teminini azaltarak yangın risklerinin azaltılması, kaçak hava sorunlarının önüne geçilmesi ve havalandırma kaynaklı giderleri minimuma indirilmesi yer altı ocaklarında güvenli ve problemsiz bir şekilde çalışılabilmesi için birincil önceliklerdendir. (Ergün ve Yılmaz 2004; Ayvazogulları vd. 1994)

Bu nedenle yer altı madenlerinde gaz ölçmeleri olmazsa olmaz ölçme grubudur. Oksijen, metan, karbonmonoksit ve karbondioksit gibi tehlikeli gazların belirlenen limitler içerisinde olup olmadığı ya da ne düzeyde oldukları kontrol edilip izlenmelidir. Örneğin kömür ocaklarında iki tür gaz ortaya çıkmaktadır. 0.7 yoğunluğa sahip metan üst kısımda birikirken 1.2 yoğunluğa sahip karbonmonoksit en alta birikmektedir. Gaz ölçme cihazı ile madende bulunan yanıcı, patlayıcı ve boğucu/zehirli gaz konsantrasyonları/içerikleri ölçülmekte, oksijen durumu izlenmekte ve bu durumların tematik haritaları üretilerek karar-destek sistemindeki oksijen azalması, tehlikeli gaz artışı vb. analizler gerçekleştirilebilmektedir. Gazların yanında sıcaklık, nem ve basınç değerlerinin de ölçülmesiyle yer altı ortamının hava kontrolü bu sistem üzerinden takip edilebilme olanağı oluşmaktadır.

Tekerlekli bir robot üzerinde bulunacak ısı görüntüleyici ve gaz detektörü gibi ortam algılayıcıları kullanılarak farklı türde bilgiler mekansal adresleri ile birlikte üretilebilmektedir. Yeraltı madenlerindeki jeolojik ve/veya yapay detaylar “Mekansal Bilgi Sistemi (Coğrafi Bilgi Sistemi-CBS, *Geospatial Information System*-GIS)”nde anlamlı biçime dönüştürülmesi ve mekansal analizlerin gerçekleştirilebilmesi planlanmaktadır.

Duyargalardan elde edilen tüm veriler bir veritabanına kayıt edilmekte, madencilik faaliyetlerinin yönetimi için görselleştirilmekte, analiz edilmekte ve CBS ortamında karar destek için kullanılması planlanmaktadır. Sistemin akış diyagramı Şekil 1’de verilmiştir.

Zeminin fiziksel özellikleri, bölgedeki yer kabuğu hareketleri, jeolojik ve atmosferik bazı etmenler, suyun dinamik basıncı gibi faktörlerden dolayı maden ocağında veya çevresinde meydana gelen geometrik şekil değişimlerine deformasyon denir (Seydanoğlu 2009). Yer altı madenciliğinde 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). Tünel, galeri vb. ortamlarda kullanılan tahkimatların deformasyonlarının izlenerek çökme yaşanmadan püskürtme beton vb. yöntemlerle güçlendirilebilmesi maden işletmelerinde üretimin kesintiye uğramadan veya tamamen durmadan ve can kaybı olmadan devam edebilmesini sağlayacaktır. Ayrıca tahkimatın ve çevresinin 3B mekansal modeli benzer formasyonlar için bir örnek teşkil edeceğinden yeni bir bölgede ve benzer formasyonda nasıl bir tahkimat sistemi ve yapısı kurulacağı önceden bilinecektir. Emniyet gerilmelerinin zaman içerisindeki değişimleri analiz edilebilir, aynı madenin içerisinde belirli yapı ve formasyonlar için bir tahkimat prototipi oluşturulabilir. 3B ölçme sisteminin sağlamış olduğu bu faydalar hem iş güvenliğini arttıracak hem de ekonomik açıdan büyük katkı sağlayacaktır.

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. Tahkimat deformasyon analizinde beklenmeyen deformasyonların erken dönemde fark edilebilmesi maden işletmesi ve maden çalışanları açısından çok önemli bir bilgidir. Ancak her hareket deformasyon olarak tanımlanamaz. Yapılan analizler ve uygulanan testler sonrasında, hareket değerlerinin anlamlı bir sonuç olarak yansımaları ile bu hareketlerin deformasyon olduğu sonucuna ulaşılabilir. Hareketli ölçme platformu tarafından belirlenen yer değiştirmenin karar-destek sisteminde deformasyon olarak belirlenmesinden sonra hangi bölgelerde güçlendirilme yapılacağına, kazı-dolgu durumlarına, da sonraki aşamaya geçiş konusunda projenin işleyişine direkt etki edecek kararlar verilebilir hatta bu sonuçlara göre projede revizyon dahi yapılabilir. Jeodezik teknikle gerçekleştirilen deformasyon ölçmeleri jeoteknik verilerle bir karar-destek sürecinde birlikte kullanıldıklarında yalnız deformasyon miktarı değil, deformasyonun neden kaynaklandığı sorusuna da cevap bulunabilir.

Sözü edilen farklı algılayıcılardan elde edilen değişik türdeki veriler tek bir global jeodezik koordinat sisteminde yer altı ortamlarının yüksek çözünürlüklü geometrik modeli ile bütünleştirilmekte ve doğal ya da yapay jeolojik detaylar (*natural and man-made geologic features*) CBS ortamında kullanılmak üzere detay bilgisi (*feature-based*) biçiminde bir mekansal veritabanında (*spatial database, geodatabase*) depolanması planlanmaktadır. 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*), jeolojik sorgulamalar yapılabilir ve metan gibi tehlikeli gazların nerede ne miktarda bulunduğu model üzerinden sorgulanabilecektir. Gaz konsantrasyonları, nemlilik seviyesi gibi geometrik/mekansal olmayan verilerin model üzerinde görselleştirilmesi (*spatially co-registered*) modelin estetik görünümünü ve kavramsal algısını zenginleştirecektir.

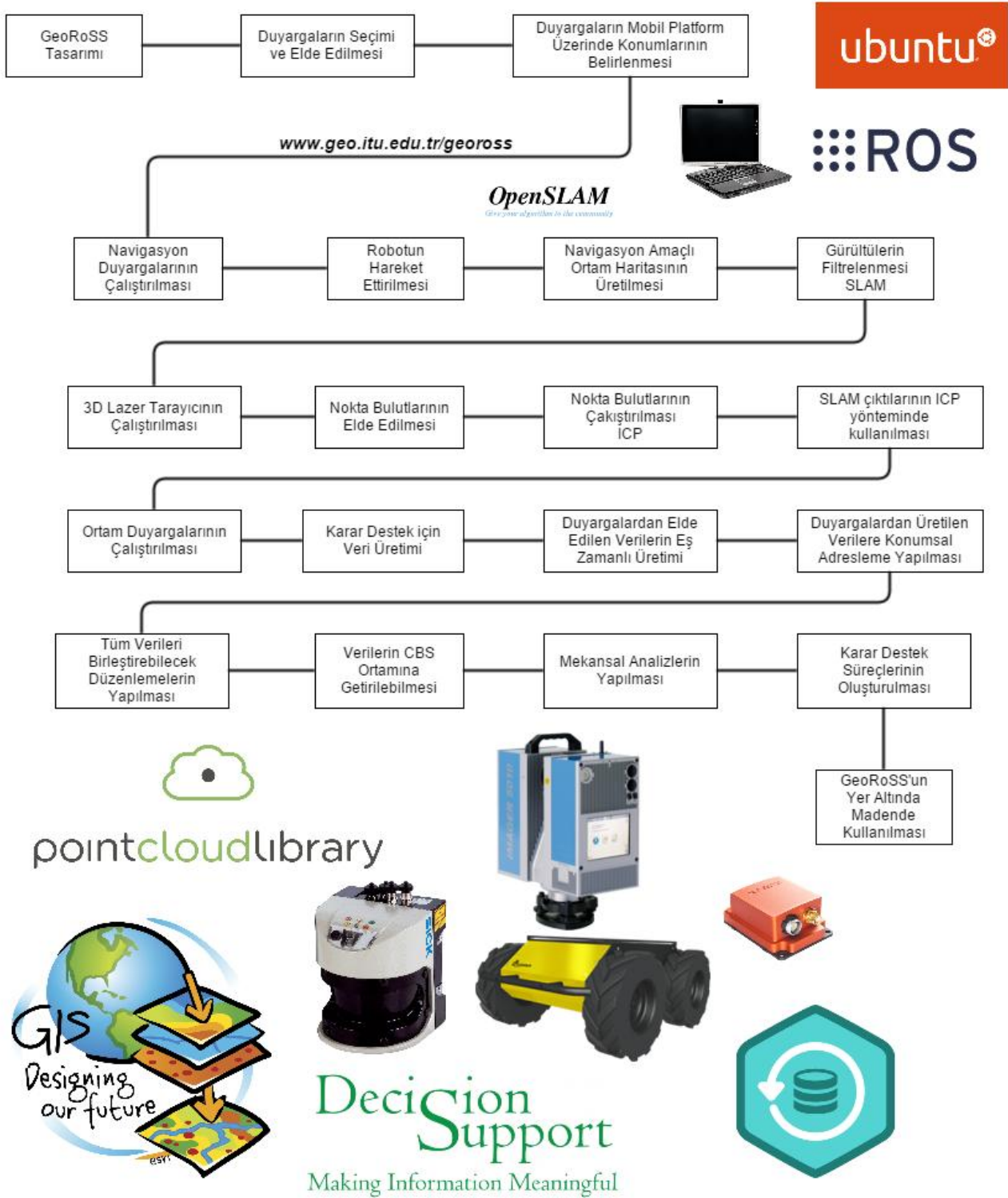
5. Sonuç

Proje kapsamında geliştirilmekte olan sistem yer altı madenciliğinde sürekli gözlem ve ölçme yapmaya dayalı bir sistem olup üretimin yönlendirilmesinde, veriminin artırılmasında ve tahkimat işlerinde kullanılması amaçlanmaktadır.

Operatör olarak insanın bulunması olası olmayan, tehlike veya risk içeren yerlerde ya da insanın etkin çalışamayacağı veya çalışmanın çok güç olacağı (maden, tünel, mağara, kanalizasyon vb.) yer altında bulunan alanlarda robotik ölçme sisteminin kullanılması, gerçekleştirilemeyecek ya da çok düşük verimlilik sağlanacağı işlerin yüksek üretkenlikte ve verimlilikte gerçekleştirilmesini sağlayacaktır.

Dünyanın en zor ve en riskli iş kolu olan madencilik sektöründe 'GeoRoSS' gibi teknolojilerin kullanımı ile işçi sağlığı ve iş güvenliğinde iyileştirme sağlanacak ve emniyetli/güvenli bir çalışma ortamı oluşturulabilecektir. Ayrıca 'GeoRoSS' üretimin artırılmasını, işletme maliyetinin düşürülmesini ve emek yoğun işlerin daha hızlı tamamlanmasını sağlayarak maden cevherinin verimli bir biçimde üretilmesine katkı verebilecektir.

Türkiye'de sıklıkla yaşanan afetler ve maden kazalarından dolayı ülkedeki robot geliştirme çalışmaları ve uygulamaları çoğunlukla arama-kurtarma faaliyetlerine yönelmiştir (*rescue robots*). Bu akımın tersine 'GeoRoSS' bir arama-kurtarma robotu olarak tasarlanmamış ve geliştirilmemektedir. Arama ve kurtarma robotlar kaza olduktan sonra afet anındaki müdahaleler için geliştirilmektedir. 'GeoRoSS' ise maden kazaları olmadan, bu kazaların yaşanmaması için özellikle tahkimat sistemlerinin izlenmesinde etkin olarak kullanılabilir. Ayrıca maden kazası öncesinde 'GeoRoSS' tarafından üretilmiş olan madenin 3B mekansal modeli, kaza sonrasında arama-kurtarma çalışmalarının planlanmasında ve yürütülmesinde önemli bir mekansal altlık ve karar-destek altyapısı oluşturacaktır.



Şekil 1: 'GeoRoSS' kavramsal tasarım mimarisi

Kaynaklar

Aksoy, C. O., Onargan, T., (2012), *Yeraltı Yapıları ve Tahkimat Tasarımı*, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi http://web.deu.edu.tr/maden/docs/tahkimat/3_tahkimat_elemanlari.pdf

Ayvazoğulları, E., Ökten, G., Tuncel, Z., (1994), *Yer Altı Kazılarında Havalandırma Uygulamaları*, Ulaşımda Yeraltı Kazıları 1.Sempozyumu, 12/1994, 283 – 307.

- Borrmann, D., Afzal, H., Elseberg, J., Nüchter, A., (2012), *Mutual Calibration for 3D Thermal Mapping*, 10th International IFAC Symposium on Robot Control (SYROCO '12), Volume 10, Part 1, ISBN 978-3-902823-11-3, Hırvatistan.
- Durrant, H., Bailey, T., (2006), *Simultaneous Localization and Mapping*, IEEE Robotics & Automation Magazine, 99-108.
- Eliazar, A., Parr, R., (2003), *DP-SLAM: Fast, Robust Simultaneous Localization And Mapping Without Predetermined Landmarks*, the Eighteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence, Meksika.
- Elseberg, J., Borrmann, D., Nüchter, A., (2011), *Efficient Processing of Large 3D Point Clouds*, Information, Communication and Automation Technologies (ICAT) 2011 XXIII International Symposium.
- Ergün, İ., Yılmaz, A. İ., (2004), *Madenlerde Havalandırma Problemleri Çözüm Yöntemleri Pervaneler ve Ölçme Metodları*, CBÜ Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi, Sayı 1, Sayfa 43-54.
- Grisetti, G., Stachniss, C., Burgard, W., (2005), *Improving Gridbased SLAM With Rao-Blackwellized Particle Filters By Adaptive Proposals And Selective Resampling*, IEEE International Conference on Robotics and Automation İspanya.
- Haehnel, D., Burgard W., Fox, D., Thrun, S., (2003), *An Efficient FastSLAM Algorithm For Generating Maps Of Largescale Cyclic Environments From Raw Laser Range Measurements*, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, ABD.
- Hebel, M., Stilla, U., (2007), *Automatic Registration Of Laser Point Clouds Of Urban Areas*, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.
- IMCET (2005), *Tahkimat*, Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi. ISBN 975-395-880-3.
http://www.maden.org.tr/resimler/ekler/d5ac6ce504b7446_ek.pdf
- Kaushik, R., Xiao, J., Morris, W., Zhu, Z., (2009), *3D Laser Scan Registration of Dual-robot System using Vision*, IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, ABD.
- Montemerlo, M., Thrun, S., Koller, D., Wegbreit, B., (2002), *FastSLAM: A Factored Solution To Simultaneous Localization And Mapping*, The Eighteenth National Conference On Artificial Intelligence, 28 Temmuz-1 Ağustos, 2002, Kanada.
- Montemerlo, M., Thrun, S., Koller, D., Wegbreit, B., (2003), *An Improved Particle Filtering Algorithm For Simultaneous Localization And Mapping That Provably Converges*, the Eighteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence, Meksika.
- Previtali, M., Barazzetti, L., Brumana, R., Scaioni, M., (2014), *Laser Scan Registration Using Planar Features*, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5, 2014. İtalya
- Rangel, J., Soldan, S., Kroll, A., (2014), *3D Thermal Imaging: Fusion of Thermography and Depth Cameras*, 12th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography, Fransa.
- Schulz, T. (2013), *Man vs. Machine: Are Any Jobs Safe from Innovation?*, Spiegel
<http://www.spiegel.de/international/business/speed-of-innovation-and-automation-threatens-global-labor-market-a-897412-2.html>
- Seydanoğlu A., (2009), *Metro Tünellerinde Deformasyon Ölçmeleri 4. Levent-Ayazağa Örneği*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi
- Smith, R., Self, M. and Cheeseman, A., (1987), *A Stochastic Map For Uncertain Spatial Relationships*, Fourth International Symposium of Robotics Research, 467-474
- Vidas, S., Moghadam, P., Bosse, M., (2013), *3D Thermal Mapping of Building Interiors using an RGB-D and Thermal Camera*, IEEE International Conference on Robotics and Automation. Almanya.