

Gezgin sualtı akustik duyurga ağlarında konumlandırma protokollerinin başarımları analizi

Melike EROL^{*}, Sema OKTUĞ

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Sualtı Duyurga Ağları (SDA) insan eliyle tehlikeli veya olanaksız sayılabilecek sualtı görevlerinde kullanılırlar. SDA'lar okyanusbiliminde, deprem ve tsunami tahmininde, askeri uygulamalarda, okyanus petrol platformlarının gözetlenmesinde ve çeşitli birçok alanda kullanılabilirler. Sualtı duyurga düğümleri sabit bir platforma tutturulmuş olabilir veya su içerisinde serbest halde yüzebilir. Su yüzeyinden metrelerce aşağıda yüzen duyurga düğümler, gezgin sualtı duyurga ağını oluştururlar. Duyurga düğümler okyanuslardan sıcaklık, akıntı hızı, tuzluluk ve görüntü kaydı gibi veriler toplarlar. Gezgin bir SDA'da, duyurga düğümler su yüzeyinin altında, akıntıyla birlikte hareket eder ve belirli bir olayı izlerler. SDA'larda en ciddi sorunlardan biri konumlandırma. Konum bilgisine, veri etiketleme ve konum-tabanlı yönlendirme protokollerinde ihtiyaç duyulur. Geniş ölçekli, üç boyutlu SDA'lar için, literatürde az sayıda konumlandırma protokolü önerilmiştir. Bu makalede, İner-Çıkar düğümlerle Konumlandırma (İÇK) ve Vekil Konumlandırma (VK) yöntemlerini tanıtır, sözkonusu yöntemlerin başarımlarını önceden önerilmiş olan bir başka yöntemle karşılaştırılmaktayız. Bu yöntem, Geniş Ölçekli Konumlandırma (GÖK). Bu üç tekniğin avantaj ve dezavantajlarını gezgin bir SDA için göstermekteyiz. Benzetim sonuçlarımız GÖK'ün yüksek konumlandırma başarımlarına sahip olduğunu, ancak bu yöntemin beraberinde yüksek enerji tüketimi ve ek haberleşme yükü getirdiğini göstermektedir. İÇK ise, yüksek konumlandırma başarımları, yüksek kesinlik, düşük enerji tüketimi ve düşük haberleşme maliyetine sahiptir. VK ise, kabul edilebilir konumlandırma başarımları, düşük enerji tüketimi ve daha az ek yük getirmekte, buna karşılık diğerlerinden daha düşük kesinlik sağladığı görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: *Sualtı duyurga ağları, konumlandırma, duyurga ağlar.*

^{*}Yazışmaların yapılacağı yazar: Melike EROL. melike.erol@itu.edu.tr; Tel: (212) 285 36 82.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Programı'nda tamamlanmış olan "Sualtı duyurga ağlarında konumlandırma ve konumlandırmanın veri dağıtımına etkisi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 10.09.2009 tarihinde dergiye ulaştırılmış, 25.09.2009 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.01.2011 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Analyzing the performance of localization protocols for underwater acoustic sensor networks

Extended abstract

Underwater Sensor Networks (USNs) can improve naval defense, earthquake/tsunami forewarning, water pollution detection, ocean life monitoring systems, etc. Stationary Underwater Sensor Networks are ideal for securing or monitoring a fixed target region, e.g. monitoring oil drilling platforms for spill detection, harbor entrances for surveillance, ocean bottom for seismic activity observation, etc. On the other hand, mobile untethered Underwater Sensor Networks are flexible and better alternatives for short term exploration of moving targets. For instance, untethered, free-floating underwater sensors can track a chemical spill or a pollutant that may be dangerous to human health or sea life.

In a sensor network, sensor nodes collect data from their surrounding and tag these data, in order to transmit them to a more powerful node for processing. Therefore, it is crucial to know the location of the sensor nodes. Location is required for data tagging, as well as, target detection, node tracking, etc. In addition, localization is essential for position-based routing algorithms which are powerful alternatives to classical routing approaches in Mobile Ad Hoc Networks (MANET).

Localization is a well studied topic in terrestrial sensor networks. Nevertheless, in Underwater Sensor Networks, localization is still challenging due to several reasons: i) unavailability of the GPS; ii) low bandwidth, long delay and high bit error rate of the acoustic links; iii) necessity of high amount of sensor nodes to cover the three dimensional region. The use of GPS is limited to surface nodes because the GPS signal does not propagate through the water. In sensor networking literature, several GPS-less (GPS-free) positioning schemes have been proposed however they usually have high overhead. The underwater sensors use acoustic links and the bandwidth of those links is low even for very short distances. Moreover, acoustic communications has high propagation delay and high bit error rate. In Underwater Sensor Networks, localization protocols are expected to avoid excessive overhead and establish localization with the least possible messages. This is also enforced by the limited battery life of the underwater sensor nodes and the difficulty of re-

charging or replacing the batteries in an underwater application. Usually, an underwater application requires a large number of sensor nodes because the data rate of the acoustic links increases with decreasing distance and shorter ranges between nodes, means that more sensor nodes are needed to cover the three dimensional oceanographic zone. In addition, in a mobile Underwater Sensor Network localization should be repeated and stale location information should be cleared periodically. Considering all these challenges, it is essential to develop novel localization protocols tailored for mobile Underwater Sensor Networks.

In this article, we introduce two distributed, scalable localization techniques; Dive and Rise Localization (DNRL) and Proxy Localization (PL). In DNRL, mobile beacons ascend and descend in the water to deliver their GPS driven coordinates. In PL, the already localized nodes act like beacons likewise multi-stage localization which is a preliminary version of PL (Erol et al., 2008). Unlike the previous work, in PL the non-localized nodes use a different metric to choose the best possible proxies among the candidates which enhances the performance of the protocol. Here, we compare the performance of PL, DNRL and Large-Scale Localization (LSL). LSL is a technique from the literature (Zhou et al., 2007). We evaluate the performance of these schemes in terms of localization success, accuracy, overhead and energy consumption. Since we compare the performance of the localization techniques for a mobile Underwater Sensor Network, a realistic underwater mobility model is essential. Recently, the works of Caruso et al. (2008) and Erol et al. (2008) have applied the real ocean current behavior to Underwater Sensor Networks. We use the “Meandering Current Mobility with Surface Effect” (MCM-SE) model to compare the performance of the three localization schemes for a mobile underwater sensor network.

The main aim of the article is to provide a comparison between recently proposed localization schemes for Underwater Sensor Networks. Based on the simulation results, we compare and analyze the performance of three recent methods that are developed for distributed localization in large-scale Underwater Sensor Networks in terms of localization ratio, accuracy, protocol overhead and energy consumption.

Keywords: Sensor networks, underwater sensor networks, localization.

Giriş

Günümüzde karasal duyurga düğümleri, boyutları küçük, maliyeti düşük ve iletişim yeteneği ile donatılmış olduklarından ortama rastgele bırakılıp bir ağ oluşturabilmektedirler. Örneğin uçaktan rastgele atılan duyurgalar artık birbirleri üzerinden paketlerini göndererek merkeze veri iletebilmektedirler. Rastgele atılan duyurgalar ölçtükleri sıcaklık, basınç vb bilgileri ancak nereden ve ne zaman topladıklarını bilirlerse işe yarar hale getirilebilirler. Yani ortama atılan duyurga düğümleri için en önemli konulardan biri zaman ve konum bilgisinin öğrenilmesidir. Duyurga düğümlerin kısa sürede atılıp toplandığı bir senaryoda, senkronizasyon düğümleri ortama bırakılmadan önce yapılırsa sistem belli bir süre, saat senkronizasyonu bozulmadan çalışabilir. Konumlandırma ise çözülmesi gereken bir problemdir.

Biz bu çalışmada Sualtı Duyurga Ağları (SDA) için konumlandırma problemine eğileceğiz. Aslında sulara duyurga yerleştirip gözlem yapmak çok yeni bir konu değildir. Okyanusbilimciler 1980'lerden beri denizleri ve okyanusları gözlemlemeye çalışmaktalar. Fakat kullanılan duyurgalar iletişim yeteneğinden yoksundurlar. Sualtı uygulamalarında en gelişmiş ürünler askeri uygulamalarda insansız araçlar olarak karşımıza çıkmakta, örneğin otonom sualtı aracı (Autonomous Underwater Vehicle), insansız sualtı aracı (Unmanned Underwater Vehicle), uzaktan kumanda edilen araç (Remotely Operated Vehicle). Fakat bu araçların da birbirleriyle iletişim yeteneği henüz bulunmamaktadır.

SDA gerçekleştirildiğinde sualtı madenlerinin keşfi, suya karışan kimyasal/biyolojik zararlı maddelerin veya çevre kirliliği yapan maddelerin tespit edilmesi, sualtı savunma ve saldırı mekanizmalarının oluşturulması, gemi navigasyonu için gerekli ortam bilgilerinin toplanması öncelikle sayılabilecek uygulama alanları olacaktır. Sualtı duyurga ağlarının gerçekleştirilmesi karasal duyurga ağlardan daha zordur. Bunun temel nedeni iletişimin sağlanacağı fiziksel ortamın özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Sualtıta iletişim akustik haberleşme ile yapılabilir. Akustik ortam düşük bantgenişliği, yüksek propagasyon

gecikmesi, yüksek hata oranı, sıcaklık ve tuzluluk değişiminden etkilenen ses hızı gibi olumsuz özelliklere sahiptir (Heidemann vd., 2006). Fiziksel katmandaki bu zorluklar tüm ağ protokol yığınına etkilemektedir. Ortama erişim, yönlendirme ve ulaşım katmanları protokolleri bu kısıtlar düşünülerek SDA'ya uygun olacak şekilde tasarlanmalıdır. Yukarıda bahsedilen konumlandırma gereksinimi, SDA için de geçerlidir. Denizden toplanan bir verinin nereden alındığının bilinmesi şarttır. Aslında konumlandırma açık havadaki karasal sistemlerde GPS ile kolaylıkla çözülen bir problemdir. Fakat kapalı ortamlar ve sualtı için GPS kullanılamaz. GPS sinyalleri binaların içine giremez ve yüksek frekanslı olması sualtında yayılmasını zorlaştırır. GPS'siz konumlandırma protokolleri kapalı karasal ortamlar için düşünülmüştür. Fakat bunlar sık mesajlaşmaya dayalı olduğu için SDA'larda kullanmaya uygun değildir.

Bu çalışmada, geniş ölçekli ve üç boyutlu SDA'lar için tasarlanmış, dağıtık üç konumlandırma protokolü, konumlandırma başarımları, iletişim maliyeti, hata oranı ve gecikme açısından karşılaştırılmaktadır. Bu protokollerden birincisi, Vekil Konumlandırma (VK) yöntemidir. VK'de önceden konumlandırılmış her bir düğüm çapa düğüm gibi davranır, ancak konumlandırılmamış düğümler farklı bir metrik kullanarak aday vekiller arasından protokol başarımlarını en çok arttıracak olanı seçerler. Makalede VK ile başarımları karşılaştırılan diğer iki protokol ise İner-Çıkar düğümleri Konumlandırma (İÇK) ve Geniş Ölçekli Konumlandırma'dır (GÖK). VK ve İÇK için durağan ve gezgin ortamlarda daha önce yaptığımız karşılaştırmalı çalışma kaynak listesinde bulunmaktadır (Erol ve Oktuğ, 2009). Bu yöntemlerin başarımları, konumlandırma başarımları, kesinlik, getirilen ek yük ve enerji tüketimi açısından sınanmaktadır. Makaledeki çalışmada, fiziksel katman ve veri bağı katmanları için gerçekçi bir akustik model kullanılmaktadır. Literatürdeki çalışmaların çoğunluğunda, bu katmanlardan kaynaklanan kısıtlar göz ardı edilmektedir. Bununla birlikte, yine literatürde gezginliğin modellenmesi için rastsal gezginlik yaklaşımı kullanılırken, bu makalede ve bu makaleye referans oluşturan çalışmaları

mızda okyanuslardan toplanan verilerle sağlanması yapılmış bir gezginlik modeli kullanılmaktadır.

İlgili çalışmalar

SDA'larda, düşük maliyetli, üç boyutlu uzayda çalışan ve gezginliği de göz önünde bulunduran çalışmalar yakın zamanda önerilmeye başlamıştır.

Konumlandırma karasal duyarga ağlarında ve robot konularında çokça araştırılmıştır. Robot konumlandırması genelde bir yer-tutucu (landmark) yardımı ile robotların görüntü işleme yeteneklerini kullanması sayesinde yapılır. SDA için böyle bir konumlandırma mümkün olmadığı için bu konuya girmeyeceğiz fakat karasal ağlar için önerilen çözümler SDA'da konumlandırmaya esin kaynağı olabilir.

SDA'da GPS kullanılamaz çünkü yüksek frekanslı GPS sinyalleri kısa sürede soğrulur. GPS kullanmayan sistemler için mesafeden bağımsız ve mesafeye bağımlı konumlandırma protokolleri önerilmiştir. Bunlar da kendi arasında çapa (anchor) kullanan ve kullanmayan olarak ikiye ayrılır. GPS çapa ve mesafe ölçümü kullanan bir yöntemdir. Burada, çapalar konumunu bilen düğümlerdir. Bu düğümlere olan mesafeler ölçülürse iki boyutlu bir sistemde üç çapa düğümün halkalarının kesiştiği nokta düğümün koordinatlarını verir. Bu yöntemin adı laterasyondur. Çapa kullanmadan da konumlandırma yapılır fakat bu durumda düğümlerin gerçek koordinatları değil birbirlerine göre konumları bulunabilir. Othman ve diğerleri (2006)'da, SDA'lar için çapa kullanmayan ve düğümlerin konumlandırma için birlikte çalıştığı bir yöntem önerilmiştir. Konumlandırma, kendi konumunu bilen bir çekirdek düğüm ile başlar ve çekirdek düğümün diğer çekirdek düğümleri sırayla seçmesiyle devam eder. Düğüm keşfi olarak adlandırılan bu aşama çok sayıda mesajlaşma yükünü beraberinde getirmektedir. Bu nedenle, bu yöntem gezgin SDA'lar için uygun değildir, ancak durağan SDA'lar için düşünülebilir.

Bir başka sınıf ise mesafe kullanmayan konumlandırma protokolleridir. Bunlar iki düğüm ara-

sındaki mesafeyi ölçmeden konumlandırma yaparlar. Chandrasenkhar ve Seah (2006) tarafından yapılan çalışmada çapa düğümler enerji düzeylerini değiştirerek, duyarga düğümlerin bulunduğu bölgeyi birbiriyle örtüşmeyen alt alanlara ayırırlar. Bir sualtı duyarga düğümü çapaların listesini ve her bir çapanın enerji düzeyini saklar. Duyarga düğüm bu bilgiyi kuyu düğüme gönderir ve kuyu düğüm, ilgili duyarganın hangi alt alan içinde bulunduğu karar verir (Chandrasenkhar ve Seah, 2006). Merkezi çalışan ve alt alanlardan birini konum olarak seçen bu yöntem, büyük ölçekli ve kesin konum bilgisi gerektiren SDA'lar için uygulanmaya elverişli değildir.

Örneğin Bulusu ve diğerlerinin yaptığı çalışmada bir odada yere konan düğümler, tavana yerleştirilmiş sabit çapa düğümlerden konumlandırma mesajı kendisine ulaşanların koordinatlarının ortalamasını alarak kendi konumunu bulmaktadır (Bulusu vd., 2000). Bu tip yöntemlerin de yüksek kurulum maliyetli olduğundan SDA'da kullanılmaya uygun değildirler.

SDA için konumlandırmada şu ana kadar çok az sayıda ve sadece benzetim çalışması yapılmıştır. Zhou ve diğerleri (2007) yaptığı çalışmada hiyerarşik bir yapı düşünülerek konumlandırma yapılmaya çalışılmıştır. Su üzerinde "yüzey düğümleri", suyun altında "normal duyargalar" ve bu duyargaların arasına yayılmış "konumlandırma düğümleri" bulunmaktadır. Yüzey düğümleri ve konumlandırma düğümleri arasında uzun mesafeli bir iletişim olduğu varsayılmış ve yüzey düğümleri GPS'ten aldıkları konum bilgisini doğrudan bu konumlandırma düğümlerine iletebildikleri varsayılmıştır. Konumlandırma düğümleri önce kendi konumlarını öğrenir, sonra bu bilgiyi normal duyargalara yayarlar. Normal duyargalardan belli bir hata payından az olarak konumunu belirleyenler de konumlandırma işleminde görev alırlar. Konumlandırma mesajı gönderemeyen yani henüz yerini bilmeyen düğümler ise kendisine gelen konumlandırma düğümü bilgilerini ve komşularına olan uzaklıklarını diğer komşularına gönderirler. Böylece düğümler kendilerinden bir kaç sekme uzaktaki konumlandırma düğümün yerini öğrenebilirler. Buradan da Öklid uzaklık belirleme tekniği ile iki

sekme uzaktaki konumlandırma düğümünü laterasyonda kullanabilir hale gelirler (Zhou vd., 2007). Sözkonusu çalışmanın zayıf yanı, yüzer düğümlerin sualtındaki konumlandırma düğümleri ile iletişiminin nasıl olacağını tam olarak tanımlanmamasıdır.

Zhou ve diğerleri (2008) yaptığı bir sonraki çalışmada ise yine aynı hiyerarşik SDA kullanılmıştır. Kestirim tabanlı bu konumlandırma yöntemi, çapa düğümün, normal duyargalara gezginlik örüntüsüne ait parametreleri bildirmesine dayanır. Normal duyargalar kendi konumlarını, güncellenmiş bir model bilgisi geldikçe yeniden kestirirler. Burada, çapa düğümler gezginlik örüntülerini kestirme ve yüzey düğümleri aracılığıyla kesitiriminin doğruluğunu sınaama yetisine sahiptir. Gezginlik örüntü modelleri doğru ise, güncelleme mesajı yayınlamazlar. Böylece, modelin doğru olması durumunda mesaj gönderilmesi önlenerek fazla enerji harcanmasının önüne geçilir (Zhou vd., 2008). Ancak burada, yüzey düğümleri ve çapa düğümler arasındaki haberleşmenin getirdiği ek yük ihmal edilmektedir. Ayrıca, çapa düğümler uzun mesafe ölçümleriyle kendi modellerini doğruladıkları zaman, çevrelerindeki düğümler girişim dolayısıyla haberleşemeyebilirler.

Bir diğer çalışma Mirza ve Schugers (2008) tarafından yapılmıştır ve gezgin SDA'lar için konumlandırma sorununu çözmeyi hedeflemektedir. Önerilen yöntemde konumlandırma sırasında düğümler komşularına uzaklıklarına ilişkin bilgileri toplarlar. Toplanan uzaklık bilgileri, veri toplama işlemi gerçekleştirildikten sonra değerlendirilir. Bu tip bir protokol, konum bilgisine ancak duyurganın gözlemlendiği olay elde edildikten sonra gereksinim duyulduğu ortamlarda yararlı olabilir. Ancak devindiriciler ile çalışan veya gerçek zamanda gözlem yapan SDA'lar için anlık konum bilgisi önem taşımaktadır.

Erol ve diğerleri (2007a) tarafından melez bir ağ mimarisi için konumlandırma algoritması önerilmiştir. Önerilen yöntemde, sualtı duyurga düğümleri durağanken, gezgin bir Otonom Sualtı Aracı (OSA) ağ bölgesini dolaşarak duyurga düğümleri konumlandırmaya çalışmaktadır. OSA kendi koordinat bilgilerini farklı yerlerden

yayınlar. Sualtı duyurga düğümleri, kendi konum bilgilerini, eş doğrusal olmayan üçten fazla OSA pozisyonu bilgisi aldıktan sonra laterasyon aracılığıyla kestirirler. Bu yöntem, yüksek konumlandırma gecikmesine neden olmasından dolayı, gezgin SDA'lar için uygun değildir.

SDA'da konumlandırma için İner-Çıkar (İÇ) duyargalar kullanması ilk olarak Erol ve diğerleri (2007b) tarafından önerilmiştir. Erol ve diğerleri (2008)'de ise İÇ'lerden yerini öğrenen normal duyargalar da konumlandırmaya katkıda bulunabilmektedir. İÇ duyargalar ile çalışan protokoller bir sonraki bölümde ayrıntılı anlatılmaktadır.

Sualtı duyurga ağları için konumlandırma protokolleri İner-Çıkar düğümlerle konumlandırma (İÇK)

İÇK az sayıda hareketli düğüm kullanarak üç boyutlu, geniş ölçekli SDA'da dağıtık konumlandırma yapmak için tasarlanmış bir protokoldür. Her duyurga kendi konumunu hesaplayabildiği yani merkezi bir birimde konum hesaplaması yapılmadığından protokol dağıtıktır. Bu özellik protokolün ölçeklenebilir olmasını ve geniş ölçekli ağlarda kullanılabilmesini sağlar. Dikey hareket özelliğine sahip İÇ düğümler suyun içersinde, basit bir mekanik yapı ile yoğunluk değiştirerek, hareket edebilirler. Benzer sistemler, günümüzde suyun kolon (dikeydeki) özelliklerini ölçmek için okyanusbilimciler tarafından kullanılmaktadır (Argo Project, 2009).

İÇ'ler suyun yüzeyindeyken GPS yardımı ile kendi konumlarını öğrenirler. Daha sonra ağdaki en alt seviyedeki düğümün iletim mesafesine kadar inerler. Bu batma esnasında periyodik olarak konumlarını anons ederler. Henüz kendi yerlerini bilmeyen suyun altındaki düğümler, İÇ'lerden gelen mesajlarla konumlarını hesaplayabilirler. İÇ'lerin kullanacağı paket formatında mesajı gönderen düğümün konumu (x,y,z) ve zaman damgası alanları bulunur.

İÇ'lerden gelen mesajları her düğüm kendi konumlandırma tablosunda saklar. Duyargalarda basınç ölçümü yapılacağından z koordinatı zaten

bilinmektedir. Konumlandırma sadece (x,y) koordinatlarını belirlemek için yapılacaktır. Bu durumda en az 3 adet doğrusal olmayan noktadan gönderilen mesaj olması gerekmektedir. İÇK duyargaların bellek kısıtını göz önüne alarak maksimum 4 mesaj saklanmasına izin verir. Konumlandırmada, laterasyon (menzil ölçümü ile konumlandırma) yöntemi kullanılmıştır (Langendoen ve Reijers, 2003). Kestirilen (x,y) koordinatları 1 no'lu denklem takımını sağlamaktadır.

$$(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2 = d_i^2 \quad (1)$$

i mesajın alındığı çapa düğüm numarası ve (x_i, y_i, z_i) ile d_i , sırasıyla koordinat ve uzaklık bilgisidir. Uzaklık, mesajlar üzerindeki gönderilme anı ve düğüme varış anı arasındaki farkın sudaki ses hızıyla çarpılmasıyla bulunur. Buna (Time of Arrival – Varış Zamanı) ToA yöntemi denir (Savvides vd., 2001). Laterasyonda önce, $(n+1)$. denklem diğerlerinden çıkartılarak sistem lineer hale getirilir. Deklemler 2 no'lu denklem takımındaki gibi düzenlenir.

$$A = \begin{bmatrix} 2(x_1 - x_n) & 2(y_1 - y_n) \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ 2(x_{n-1} - x_n) & 2(y_{n-1} - y_n) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$b = \begin{bmatrix} x_1^2 - x_n^2 + y_1^2 - y_n^2 + z_1^2 - z_n^2 - 2z(z_1 - z_n) + d_n^2 - d_1^2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ x_{n-1}^2 - x_n^2 + y_{n-1}^2 - y_n^2 + z_{n-1}^2 - z_n^2 - 2z(z_{n-1} - z_n) + d_n^2 - d_{n-1}^2 \end{bmatrix}$$

Buradan denklemler üzerinde hatayı en aza indirgeyerek (x,y) koordinatlarını kestirmek için en küçük kareler kestirimcisi (least squares estimator) kullanılarak $A\varphi=b$ çözülür. $\hat{\varphi} = [\hat{x} \ \hat{y}]^T$ kestirilen koordinatlardır.

Kestirimde, bazı harici (outlier) değerler hatalı sonuçlar vereceğinden hatanın kontrol edilmesi ve uygun olmayan sonuçların yok edilmesi gerekir. Eğer ε maksimum iletim mesafesinden

(communication range) büyükse kestirimin hatalı olduğu kabul edilebilir (Langendoen ve Reijers, 2003).

$$\varepsilon = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \sqrt{(x_i - \hat{x})^2 + (y_i - \hat{y})^2 + (z_i - z)^2} - d_i \right| \quad (3)$$

Vekil (Proxy) konumlandırma (VK)

İÇK ile konumlandırma uzun zaman almaktadır. Bunun sebebi İÇ'lerin tüm ağın derinliklerine mekanik olarak yoğunluk değiştirerek inmesi ve suyun içerisinde hızlı hareket olanağı bulunmamasından dolayı, bu inme işleminin uzun zaman almasıdır. Yani ağın derinlerinde yer alan bir duyarga, veri toplasa bile henüz konum bilgisi edinemediğinden bu verilerin bir anlamı olmayacaktır. Duyargaların hızlı konumlandırma bilgisi edinmesi gerektiğinde, örneğin zararlı bir maddenin suyun içerisindeki ilerlemesini merkeze haber veren bir SDA için konumlandırma probleminin hızlıca çözülmesi gerekmektedir. Erol ve diğerleri (2008)'de, bu problemi çözmek için "aşamalı" bir yöntem önerilmiştir. "Aşamalı" konumlandırmada hataları azaltmak için referans düğümlerin hatalarının da hesaba katıldığı vekil konumlandırma yöntemi önerilmiştir. Vekil konumlandırma yönteminde konumlandırma işlemini hızlandırmak için konumunu öğrenen ve konum hatası az olan duyargalar vekil düğüm olurlar. Vekil düğümler İÇ'ler gibi kendi konumlarını anons edebilirler. Suyun içerisinde mesajların ilerlemesi, düğümlerin ilerlemesinden daha hızlı olduğu için bu mekanizma ile daha hızlı konumlandırma yapılabilir (Erol vd., 2008). VK için paket içeriğinde mesajı gönderen düğümün konumu (x,y,z) , zaman damgası, derinlik kısıtı ve sekme sayısı alanları bulunur. Burada (x,y,z) ve zaman damgası İÇK ile aynı işlevi görür. Derinlik kısıtı mesajlaşma maliyetini düşürmeyi amaçlar. Belirtilen derinliğin üzerindeki düğümler vekil olamazlar. Sekme sayısı vekil düğümün çapa düğümden kaç sekme uzakta olduğunu gösterir. İÇ'ler için bu sekme sayısı sıfırdır.

Konumunu bilmeyen düğüm, İÇ veya vekil düğümden gelen mesajı kullanabilir. İÇK'daki gibi 4 mesaj saklanmaktadır. Konumlandırma tablosunda zaman damgası en yeni, sekme sayı-

sı en az olan düğümün bilgilerini saklanmaktadır. Üç doğrusal olmayan noktadan mesaj alındığında İÇK'daki gibi laterasyon yöntemi ile düğüm kendi konumunu belirler.

Geniş ölçekli konumlandırma (GÖK)

Zhou ve diğerleri (2007)'de, geniş ölçekli SDA'lar için bir konumlandırma yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntemde yüzey düğümleriyle birlikte normal sualtı düğümleri ve çapa düğümleri olmak üzere iki tip sualtı düğümü kullanılmaktadır. Yüzey düğümleri kendi konumlarını GPS aracılığıyla kolaylıkla öğrenebilirler. Çapa düğümler tüm ağa yayılmış durumdadırlar. Çalışmayı önerenler, çapa düğümlerin konumlandırılması sorununu göz önünde bulundurmamaktadırlar. Buna gerekçe olarak da, çapa düğümlerin, kendi konumlarını yüzey düğümleri ile haberleşerek çözebilecekleri gösterilmektedir. Çapa düğümlerin konumlandırılması Zhou ve diğerleri (2007)'de belirttiği kadar basit bir işlem olmasa da, bizim önerdiğimiz tekniklerle karşılaştırırken, GÖK'te çapa düğümlerin konumlandırılması, orjinal çalışmayla özdeş olması amacıyla ihmal edilmektedir.

Normal duyurga düğümlerin konumlandırılmasında, çapa düğüm kendi koordinatlarını taşıyan bir mesaj yayımlar. Bu mesajlara ek olarak, tüm düğümler periyodik olarak aralarında *beacon* adı verilen sinyalleri (işaretleri) değiştirerek komşularına olan uzaklıklarını ölçerler. Normal bir düğüm yeterli miktarda konumlandırma mesajı almışsa, kendi koordinatlarını kesirmek için laterasyon uygular. Yeterli mesaj sayısı, 3-boyutlu konumlandırmada üçtür; her düğüm derinliğe ilişkin koordinat bilgisini basınç duyargası ile elde edebilir. Sonrasında, kendi konumunu öğrenen her düğüm, kendi güven değerini (σ) hesaplar. Güven değeri çapa düğümler için daima 1'dir. Diğer düğümler için hesaplanması ise 4 no'lu denklemde gösterilmiştir. Denklemde (\hat{x}, \hat{y}) kestirilen (x, y) koordinat bilgisini, (x_i, y_i, z_i) çapa düğümlerin koordinatlarını, d_i düğüm ve çapa arasındaki uzaklığı göstermektedir. Güven değeri belirli bir eşik değerinin üzerine çıktığı zaman, düğüm diğer konumlandırılmamış düğümler için bir referans düğüm haline gelmektedir.

$$\sigma = 1 - \frac{\sum_i |(\hat{x} - x_i)^2 + (\hat{y} - y_i)^2 + (z - z_i)^2 - d_i^2|}{\sum_i ((\hat{x} - x_i)^2 + (\hat{y} - y_i)^2 + (z - z_i)^2)} \quad (4)$$

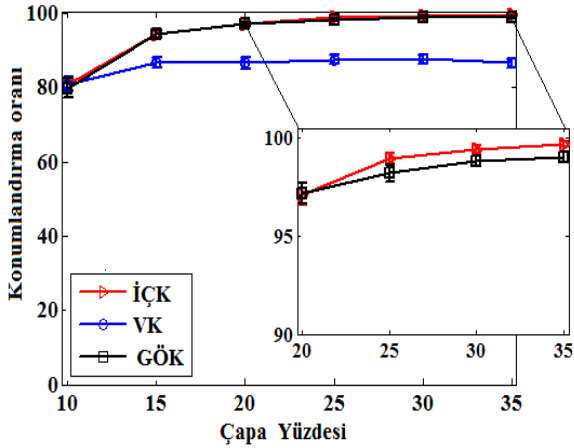
Bir düğümüne gelen konumlandırma mesajları, düğümün konumlandırılması için yeterli değilse, düğüm kendisine gelen çapa mesajlarını ve komşularına olan uzaklık ölçümlerini diğer komşularına gönderir. Bu mesajlar, düğümüne iki sekme uzaklıktaki çapaları da laterasyonda kullanma olanağı sağlayan Öklid algoritmasında kullanılır. Zhou ve diğerleri (2006)'da, Niculescu ve Nath tarafından tanıtılan 2-boyutlu öklid algoritmasını (Niculescu ve Nath, 2004) 3-boyuta uyarlamıştır. Öklid uzaklığı kestirimi algoritmasında amaç, birbirinden iki sekme uzaklıkta bulunan iki düğüm arası uzaklığı, tek sekme uzaklığı ölçümleri kullanarak öngörmektir. Öklid uzaklığı algoritması, düğümlerin komşularına ve çapa düğümlere uzaklıklarını bir veri tabanında tutmalarını gerektirmektedir. Veritabanları düğümler arasında periyodik olarak değiştirilmeli ve böylece konumlandırılmamış düğümlerin Öklid uzaklığı algoritmasını çalıştırmaları sağlanmalıdır. Zhou ve diğerleri (2006)'da yapılan bu çalışmada, konumlandırma mesajlarının sayısı sınırlanmaktadır.

Benzetim sonuçları

Bu çalışmada İÇK, VK ve GÖK protokolleri, konumlandırma başarımları (konumlarını öğrenebilen duyurgaların tüm duyurga sayısına oranı), iletişim maliyeti (gönderilen mesajın duyurga sayısına oranı), enerji tüketimi, ortalama hata (hatanın iletim mesafesine oranı) ve gecikme (bir düğümün ilk kez konumunu öğrenmesine kadar geçen süre) kriterleri ile değerlendirilmektedir. Benzetimlerde gezgin bir ağın bulunduğu senaryo düşünülmüştür. Herhangi bir yere bağlanmayan duyurgalar sudaki akıntılarla hareket edecektir. Bu hareketin modellenmesi için okyanusbilimcilerin kullandığı modellere bakmak gerekmektedir. Caruso ve diğerlerinin 2008'de yaptığı çalışmada da gerçekçi bir okyanus akıntı modeli ilk defa SDK'lara uygulanmıştır. Bu modelin ayrıntıları için Erol ve diğerleri (2008) yılında yayımladığı çalışmaya bakılabilir.

Benzetimlerde Qualnet programı kullanılmıştır. Fiziksel katmanda akustik haberleşme temel alınmıştır. İletim mesafesi 180m olarak belirlenmiştir. Duyargalar (1000x1000x600)'luk bir hacme dağıtılmıştır. Duyarga sayısı 250 ve düğüm kertesesi 9'dur. İÇ sayısı %10, %15, %20, %25, %30 ve %35 olarak değiştirilmektedir. İÇ ve vekil düğümler konumlarını her 100s'de bir anons ederler. Benzetim sonuçları 50 çalıştırmanın ortalamasıdır. Sonuçlar %95'lik güven aralığı ile verilmiştir.

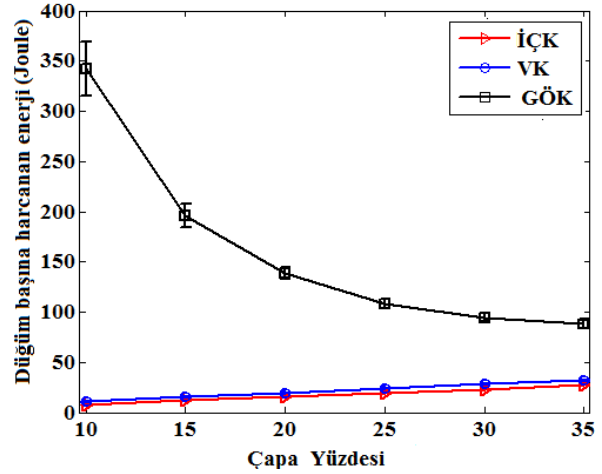
Hareketli SDA'da duyarga düğümler herhangi bir yere bağlanmamış ve akıntılarla sürüklenmeye müsait durumdadır. Şekil 1'den görüldüğü üzere, bu tip bir ağ için İÇK ve GÖK'ün konumlandırma başarısı VK'dan oldukça yüksektir ve artan çapa düğümlerle performans daha da iyileşir. İÇK ve GÖK'ün performansları eşdeğer görünmektedir. Ancak şekilde ölçüğü genişlettiğimiz takdirde, %20 çapa düğüm yüzdesinin üzerinde İÇK'nin konumlandırma başarısında iyileştirme sağlamaktadır. Büyük sayıda çapa düğümler için İÇK ve GÖK neredeyse tüm ağı konumlandırabilirken, VK %85'lerde kalmaktadır. Çapa oranı %10 düzeyindeyken tüm yöntemlerin ağdaki düğümlerin %80'ini konumlandırabildikleri görülmektedir.



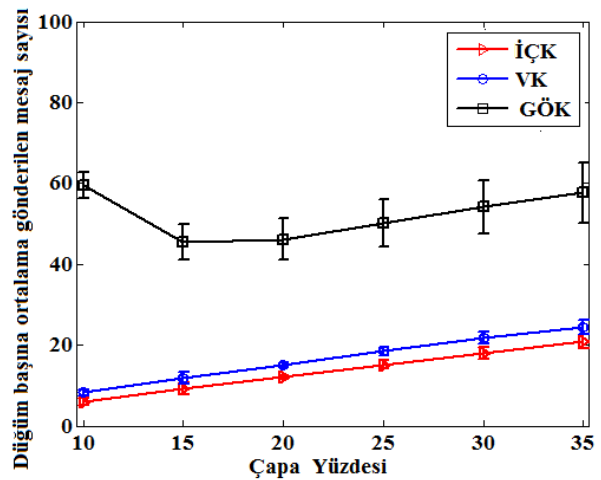
Şekil 1. Gezgin SDA'da konumlandırma oranı

Şekil 2'te her üç protokol için düğüm başına gönderilen mesaj sayısı gösterilmektedir. Konumlandırma başarısı İÇK ve VK'den daha iyi olan GÖK'ün konumlandırmada düğüm başına gönderdiği mesaj sayısı diğer protokollerin çok üzerindedir. Enerji tüketimi, farklı değişkenlerin

fonksiyonu olarak temsil edilebilir. Bu çalışmada, enerji tüketiminin önemli bir kısmının paket iletimi sırasında gerçekleştiği varsayılmaktadır. Benzetimlerde akustik bir ağ kullandığımız için sualtı düğümleri akustik modem kullanmaktadırlar. Bu çalışmada Aquacommm firması tarafından üretilen akustik modemin güç tüketimi örnek alınmıştır. Söz konusu modemin kapsama alanı 200 metredir. Burada bir bit iletimi için gerekli enerjiyi 4.5mJ olarak, iletilen bit sayısı ve Aquacommm modeminin enerji değerlerini kullanarak Şekil 3'te enerji tüketimini göstermekteyiz. Şekilde görüldüğü üzere, GÖK'ün enerji tüketimi VK ve İÇK'den çok yüksektir. Düşük çapa yüzdesi için GÖK, VK ve İÇK'den 300 kat fazla enerji tüketmektedir. Yüksek çapa yüzdelerinde ise GÖK, VK ve İÇK'den 10 kat fazla enerji tüketmektedir.

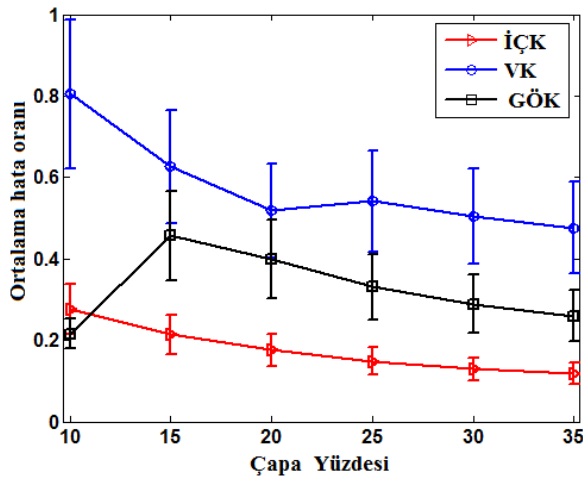


Şekil 2. Gezgin SDA'da ek yük



Şekil 3. Gezgin SDA'da enerji tüketimi

Konumlandırma doğruluğu (kesinliği), ortalama hata oranı ile temsil edilmektedir. Ortalama hata, bir düğümün gerçek konumu ve kestirilen konumu arasındaki farktır. Elde edilen değer kapsama alanı (180 m) ile normalize edilerek ortalama hata oranı elde edilir. Şekil 4'te gezgin bir SDA için ortalama hata oranı gösterilmektedir. VK, İÇK ve GÖK'ten daha yüksek hata oranına sahiptir. VK'nin ortalama hata oranı, tüm çapa yüzdeleri için 90 metrenin üzerindedir. Bu hata oranı, normal bir duyurga ağ için çok yüksek görünse de, 3-boyutlu SDA ortamı için kabul edilebilir düzeydedir. Şekle göre GÖK'ün ortalama hatasının VK'nin ortalama hatasından düşüktür. GÖK'ün hata oranı çapa yüzdesi %25'in üzerine çıktığında düşmektedir. İÇK'nin ortalama hatası tüm çapa yüzdeleri için 40 metrenin altındadır. İÇK'nin konumlandırma doğruluğu diğer yöntemlerden daha yüksektir.



Şekil 4. Gezgin SDA'da hata oranı

Sonuç

Bu çalışmada Vekil Konumlandırma (VK), İner-Çıkar Duyurgalarla Konumlandırma (İÇK) ve Geniş Ölçekli Konumlandırma (GÖK) protokollerinin sualtı duyurga ağlarının (SDA) konumlandırılmasındaki başarımları karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- İÇK sözkonusu protokoller içinde en yüksek konumlandırma oranı (başarısı) ve en kabul edilebilir hata oranına sahip olan protokoldür. Ayrıca düşük enerji tüketir ve düşük haberleşme maliyetine sahiptir.

- GÖK'de yüksek konumlandırma başarımlarına ve düşük hataya sahiptir fakat sisteme getirdiği ek haberleşme yükü ve enerji tüketimi diğer protokollerin oldukça üzerindedir.
- VK'de ise, ortalama konumlandırma başarımlarına sahiptir, az miktarda ek yük getirmektedir ve enerji tüketimi de düşük düzeyde kalmaktadır. Fakat hata oranı diğer protokollerden yüksektir.

Kaynaklar

- Bulusu, N., Heidemann, J. ve Estrin, D., (2000). Gps-less low cost outdoor localization for very small devices, *IEEE Personal Communications Magazine*, **7**, 5, 28-34.
- Caruso, A., Paparella, F., Erol, M., Vieira, L. ve Gerla, M., (2008). Meandering current model and its application to underwater sensor networks, *Proceedings, INFOCOM'08*, 221-225, Phoenix.
- Chandrasenkar, V. ve Seah, W., (2006). An area localization scheme for underwater sensor networks, *Proceedings, OCEANS'06-Asia Pasific*, 1-8, Boston.
- Erol, M. ve Oktuğ, S., (2009). Sualtı duyurga ağlarında konumlandırma, *Bildiri Kitabı, IEEE Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı (SİU09)*, Antalya.
- Erol, M., Vieira, L. ve Gerla, M., (2007a). Auv-aided localization for underwater sensor networks, *Proceedings, International Conference on Wireless Algorithms, Systems and Applications (WASA)*, 44-54, Chicago.
- Erol, M., Vieira, L. ve Gerla, M., (2007b). Localization with Dive'N'Rise (DNR) beacons for underwater acoustic sensor networks, *Proceedings, Workshop on Underwater networks*, 97-100, Montreal.
- Erol, M., Vieira, L., Caruso, A., Paparella, F., Gerla, M. ve Oktug, S., (2008). Multi-stage underwater sensor localization using mobile beacons, *Proceedings, SENSORCOMM08*, 710-714, St Rafael.
- Heidemann, J., Ye, W., Wills, J., Syed A. ve Li, Y., (2006). Research challenges and applications for underwater sensor networking, *Proceedings, IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, 228-235, Las Vegas.
- Langendoen, K. ve Reijers, N., (2003). Distributed localization in wireless sensor networks: A quantitative comparison, *Elsevier Computer Networks*, **43**, 499-518.
- Mirza, D. ve Schugers, C., (2008). Motion-aware self-localization for underwater sensor networks,

- Proceedings*, ACM Workshop on Wireless Network Testbeds, Experimental Evaluation and Characterization, 51-58, San Francisco.
- Niculescu, D. ve Nath, B., (2004). Position and orientation in an ad hoc network, *Ad Hoc Networks*, **1/2**, 133-151.
- Othman, A.K., Adams A.E. ve Tsimenidis, C.C., (2006). Node discovery protocol and localization for distributed underwater acoustic networks, *Proceedings*, Advanced International Conference on Telecommunications, 93-94, Guadeloupe.
- Savvides, A. Han, C.C. ve Strivastava, M.B., (2001). Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors, *Proceedings*, MobiCom, 166-180, Rome.
- Zhou, Z., Cui, J. ve Zhou, S., (2007). Localization for large-scale underwater sensor networks, *Proceedings*, IFIP Networking'07, 108-119, Atlanta.
- Zhou, Z., Cui, J. Ve Bagtzoglou, A., (2008). Scalable localization with mobility prediction for underwater sensor networks, *Proceedings*, INFOCOM, 2198-2206, Phoenix.
-
- Aquacomm modem,
<http://www.dspcomm.com>, (25.06.2009).
- Argo Project,
<http://ioc.unesco.org/iocweb/docs/argo-3000-press-release>, (07.08.2009).