

Sürü Hava Araçları için Görelî Konumlandırma Relative Localization for Swarm Aerial Vehicles

Alptuğ Aytekin*, Furkan Bağcı*, Mustafa Bozdağ*,
Nisanur Camuzcu*, Alperen Duru*, Mehmet Saim Elma*,
Amirhossein Maghsoudi, Billur Barshan
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
Bilkent Üniversitesi, Ankara, Türkiye
[alptug.aytekin, furkan.bagci, mustafa.bozdag]@ug.bilkent.edu.tr
[nisanur.camuzcu, alperen.duru, saim.elma]@ug.bilkent.edu.tr,
[amirhossein, billur]@ee.bilkent.edu.tr

Serdar Köse ve Çağlar Akman
Komuta Kontrol ve Savunma Teknolojileri
HAVELSAN A.Ş.
Ankara, Türkiye
[serdarkose, cakman]@havelsan.com.tr

Özetçe —İnsansız Hava Aracı (İHA) sürü yapısına ulaşmak için sürüdeki İHA'ların birbirlerinin konumunu bilmesi ve tüm İHA'ların karar verme sürecinin bir parçası olması gerekir. Küresel Uydu Seyrüsefer Sistemi'nin düşük hassasiyeti ve yayının bozulma olasılığı, onu yoğun formasyon uçuşu için uygun bir seçenek olmaktan çıkarmaktadır. Bu sorunların üstesinden gelmek için ultra geniş bant (Ultra-Wide Band, UWB) sinyallerin kullanılması önerilmiştir. UWB sinyaller, bant genişlikleri sayesinde yayın engellenmesine dayanıklıdır ve yüksek hassasiyetli konum belirleme algoritmaları için kullanılabilirler. Bu bildiride, UWB sinyaller kullanılarak İHA'lar için görelî konumlandırma üzerine yapılan çalışmalar ve gözlemler anlatılmakta ve konumlandırma performans sonuçları sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler—İHA, GNSS, UWB, formasyon, sürü İHA, görelî konumlandırma.

Abstract—In Unmanned Aerial Vehicle (UAV) swarm formation, it is required that UAVs in the swarm should have the location information of other swarm members and all UAVs should be a part of the decision process. Global Navigation Satellite Systems, GNSS, is not a viable option for dense formation flight due to its low accuracy and susceptibility to jamming. To overcome these issues, ultra-wideband (UWB) signals can be used. UWB signals are resilient to jamming and can be used for highly accurate localization algorithms, thanks to their wide bandwidth. In this paper, two techniques on relative localization of the swarm members by utilizing UWB signals are proposed and tested. Their localization performance results are presented.

Keywords—UAV, GNSS, UWB, formation, UAV swarm, relative localization.

I. GİRİŞ

İHA'ların formasyonda sürü halinde uçabilmesi ve sürüdeki araçların buna göre hareket edebilmesi için grup üyelerinin sürünün konum bilgisine sahip olması gerekmektedir. İHA'ların yüksek hızlarda hareket etmesinden ötürü bu bilgilerin doğruluğu kritik öneme sahiptir.

Küresel uydu seyrüsefer sistemi (Global Navigation Satellite Systems, GNSS) sinyalleri sürü formasyon uçuş uygulamaları için yetersiz kalmaktadır. GNSS konumlandırma doğruluğu yaklaşık 5–6 m'dir ki bu da yoğun ve dinamik bir İHA uçuş

formasyonuna uygun değildir [1]. Bu nedenle, sürü üyelerinin görelî konumlandırılması için farklı bir yaklaşım gereklidir. GNSS'nin bir diğer dezavantajı da sinyallerin bozulma olasılığıdır [2]. Bu koşullar, görelî konumlandırma için kullanılacak ideal bir teknoloji bulma çabasını gerektirmektedir.

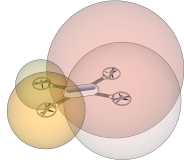
Ultra geniş bant (UWB), bant genişliği merkez frekansın yüzde 20'si veya 500 MHz'den büyük olan sinyaller olarak tanımlanmıştır. İHA sürülerinde UWB teknolojilerinin kullanımı, bu soruna çözüm olma potansiyeline sahip olup konumlandırma için son teknoloji bir yaklaşımdır [2, 3]. Benzer çalışmalar insansız kara araçları için de yapılmıştır [4]. Bu projede, merkez frekansı 6.5 GHz olan UWB sinyalleri kullanan Decawave DWM ürünleri 10 Hz ölçüm sıklığında kullanılmıştır. Bu yaklaşımda, UWB sinyallerinin bant genişliklerinin yüksek olması ve buna denk olarak zamanda kısa genişlikte olan sinyal yapısı sayesinde daha yüksek hassasiyetli konumlandırma yapmak mümkündür. Aynı zamanda, bu bantın geniş olması nedeniyle UWB sinyaller yayın bozunumuna da daha dayanıklıdır. Dolayısıyla, son zamanlarda literatürde de konumlandırma için UWB sinyallerin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır [5, 6].

Bu bildiride, dört rotorlu dönerkanatlı İHA sürülerinin yoğun ve dinamik formasyon uçuşlarında UWB sinyalleri kullanılarak görelî konumlandırma için gövdeye yerleştirilmiş dört referans çapalı ve varış faz farkı yöntemleri açıklanmıştır. Ayrıca, bu yöntemlere ait uzaklık ve yön bulma performans sonuçlarına da yer verilmiştir.

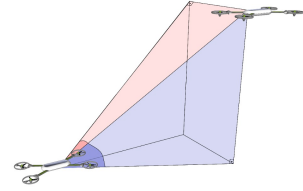
II. İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Sürü uygulamaları daha esnek ve dinamik bir oluşum olup çok yönlü tek bir üyeye göre daha avantajlı olmaktadır. Literatürde dinamik ve yoğun İHA sürüleri için UWB uzaklık protokolü kullanılarak sürü İHA'larda yoğun ortamlarda çalışmalar yapılmıştır [5–7]. UWB, Genişletilmiş Kalman Süzgeci (Extended Kalman Filter, EKF) ile birlikte kullanıldığında üç boyutta (3B) konumlandırma yüksek doğrulukta (~ 0.4 m) sağlanmıştır ve son yıllarda UWB temelli konumlandırma sistemleri önemli ölçüde gelişmiştir [6, 7]. UWB kullanılarak uzaklık doğru bir şekilde kestirilebildiğinden, UWB teknolojisinin hem ağ oluşturma hem de konum kestiriminde kullanılması da önerilmiştir [5]. Ayrıca, UWB sinyallerinin yüksek

* İlk altı yazar eşit katkıda bulunmuştur.



Şekil 1: Dört referans çapalı sistem



Şekil 2: İkili faz farkı konumlandırma sistemi

zaman çözünürlüğü nedeniyle, zamana dayalı konum tahmin şemaları genellikle benzer sistemlerden daha iyi doğruluk sağlamaktadır [8].

Quarelta et. al, çalışmalarında UWB ile uzaklık ölçümü için uçuş süresi (Time of Arrival, ToA) yöntemini kullanmıştır [6]. Varış zaman farkının (Time Difference of Arrival, TDoA) ToA yöntemine göre daha kesin sonuçlar sunduğu ancak İHA sürüleri için çözülmesi gereken çok önemli bir problem olan hareketliliği sınırladığı belirtilmiştir [6]. Ek olarak, UWB ile konumlandırmanın uygulanabilirliği için çoklu tespit noktaları kullanımının konumlandırmanın doğruluğunu artıracığı yapılan çalışmalarda belirtilmiştir [2–6]. Varıştaki Faz Farkı (Phase Difference of Arrival, PDoA) ve TDoA algoritmalarının 3B konumlandırma için hibrit kullanımının teorik incelemelerinin olduğu çalışmalar da mevcuttur, ancak bu çalışmalarda deneysel sonuçlar verilmemiştir [9].

Literatürde mevcut olan çalışmalar büyük çoğunlukla kapalı ortamda sabit çapa kullanılarak yapılmakla birlikte açık ortamdaki çalışmalarda da göreceli konumlandırma için sabit çapa kullanılmıştır [2–10]. Açık ortamlarda konumlandırma için yapılan çalışmalar da mevcuttur. Ancak, bu çalışmalar çoğunlukla UWB sinyaller kullanmak yerine görüntü işleme teknikleri veya ışık tespiti ve uzaklık sensörleri kullanılarak yapılmaktadır [6–11].

III. YÖNTEMLER

A. Yöntemlerin Mimarisi

Bu bildiride iki farklı yöntem ele alınmıştır. Dört referans çapalı konumlandırma sisteminde İHA'nın dört köşesine birer UWB çapa yerleştirilmekte ve herhangi bir noktanın konumlandırılması, bu çapalara olan uzaklıkların kesiştirilmesi ile elde edilmektedir. Şekil 1'de gösterilen kürelerin merkezi çapa konumu, yarı çapları ise konumlandırılan noktaya olan uzaklıktır. Çift antenli dizi ile PDoA kullanılarak düzlemsel konumlandırma yapılabilir. Üç boyutta konumlandırma yapabilmek amacıyla iki adet çift antenli dizi ile PDoA kullanımı öne sürülmüştür. Şekil 2'de gösterilen açık pembe ve açık mavi üçgenler PDoA'ların konumlandırma yaptıkları düzlemleri göstermektedir.

B. Dört Referans Çapalı Konumlandırma

Her bir İHA üzerinde, İHA platformunun köşelerine denk gelecek şekilde dört adet UWB alıcısı (çapa) ve İHA platformunun merkezine denk gelecek şekilde bir adet UWB vericisi (etiket) vardır. Bir İHA'nın üzerindeki etiket tarafından yayılan UWB sinyalleri diğer bir İHA üzerindeki çapalar ile konumlandırılmaktadır. Her bir İHA diğerlerini kendi yerel koordinat sistemine göre konumlandırmaktadır. Böylelikle

İHA'ların birbirlerine göre göreceli konumları hesaplanmaktadır. Çapalı sistemde uzaklık ölçümü, kullanılan modüllerin UWB sinyallerini değiş tokuş yapmasıyla uçuş süresini ölçmesine dayanmaktadır. Denklem (1)'de N adet çapanın olduğu bir sistemde çapalar tarafından bir etiketten alınan sinyal modellenmiştir.

$$r(t) = \sum_{i=1}^N \alpha_i s(t - 2\tau_i) + n(t) \quad (1)$$

Denklem (1)'deki α_i ilgili çapanın kanal katsayısına, $s(t)$ etiket tarafından yayılan UWB sinyaline, ve τ_i sinyalin çapaya varış zamanına, $r(t)$ alınan sinyallerin toplamına, $n(t)$ ise beyaz Gauss gürültüsüne denk gelmektedir. UWB konumlandırma sinyali aynı zamanda kimlik bilgisi taşıdığı için hangi UWB etiket ile çapa arasında uzaklık ölçüldüğü bilinmektedir.

Yukarıdaki (1) matematiksel model kullanılarak bir maksimum olabilirlik (maximum likelihood, ML) kestirimi yapılmış, bu kestirimin varyans analizi içinse Cramér-Rao Alt Sınırı (CRAS) kullanılmıştır. Denklem (2) ve (3) ile CRAS için Fisher bilgi matrisi ile bu matrisin tersi hesaplanmış olup ML kestirimcisi kullanılarak CRAS üzerinden farklı x , y , z değerleri için varyans alt sınırını veren bir limit bulunmuştur.

$$\hat{\mathbf{I}}_{ML, ToA} = \arg \max_{x,y,z} \Lambda(\Theta) \quad (2)$$

$$\mathbf{I}^{-1}(\hat{\theta}_{ML}) = -E \left[\frac{\partial \Lambda(\Theta)}{\partial \Theta} \right]^{-1} \quad (3)$$

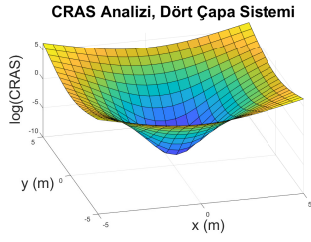
Alınan uzaklık değerleri kullanılarak bir dizi birbirinden bağımsız doğrusal denklemler oluşturulup konumlandırma (4) ile yapılmaktadır. Denklem (4)'de x_i, y_i, z_i, d_i değerleri, i numaralı çapaya ait koordinat ve uzaklığa denk gelmektedir. Bu kestirim için sistem mimarisi bölümünde anlatılan küreler mantığı kullanılmıştır. Parametre araması ile x , y , z koordinatları bu kürelere uzaklıkları toplamı en az olan nokta olarak kestirilmişlerdir.

$$-2 \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & -\frac{1}{2} \\ x_2 & y_2 & z_2 & -\frac{1}{2} \\ x_3 & y_3 & z_3 & -\frac{1}{2} \\ x_4 & y_4 & z_4 & -\frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ r^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_1^2 + d_1^2 \\ -r_2^2 + d_2^2 \\ -r_3^2 + d_3^2 \\ -r_4^2 + d_4^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

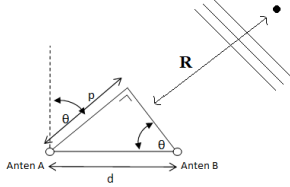
$$r^2 = x^2 + y^2 + z^2$$

$$r_i^2 = x_i^2 + y_i^2 + z_i^2, i \in \{1, 2, 3, 4\}$$

Denklem (2–3) ile verilen varyans analizi ile farklı konumlar için varyans değişiminin karakteristiği incelenmiştir. Simülasyonlarda, $s(t)$ için, literatürde tanımlı standart UWB sinyalleri kullanılmıştır [12]. Bu simülasyonlarda kanal katsayısı gibi gerçek dünya verileri sabit verilmiş olup genel bir varyans değişim karakteristiği gözlemlenmiştir. Şekil 3'te gösterildiği



Şekil 3: CRAS simülasyonu



Şekil 4: İki antenli PDoA modeli

gibi en optimal çapa yerleştirmenin, çapaların birbirlerinden en uzak olduğu, yani İHA'nın motorlarının barındığı en uç kısımlarda konuşlandırılmaları ile elde edildiği belirlenmiştir.

C. İkili Faz Farkı Konumlandırması

Çift antenli PDoA kullanılarak, UWB birim taşıyan İHA'nın konumu, belli bir düzlemde, olası iki noktaya kadar tayin edilebilmektedir. Şekil 4, çift antenli PDoA sistemini göstermektedir.

Konumlandırılmak istenen birimin uzaklığı (R), antenlerin birbirine olan uzaklığından (d) büyükse Şekil 4'te gösterildiği gibi dik üçgen yaklaşımı kullanılabilir. Bu yaklaşıma ek olarak nokta kaynak ve nokta alıcı, $\sin \theta$ için küçük-açı formülü ve düzlem dalgaları yaklaşımları kullanılırsa, denklem (5-9) elde edilmektedir [13]. Bu denklemlerde p sinyalin antenlere varışında katedilen yol farkı, θ varış açısı, f frekans, c ışık hızı ve Δ ise varıştaki faz farkıdır. Denklem (9)'da elde edilen y_0 değeri pozitif veya negatif olarak seçilebilmektedir, yani PDoA sistemi $+y$ ve $-y$ yarı-düzlemlerini birbirinden ayırt edemez. Genel bir kanı olarak, negatif y_0 seçimi yapılabilir.

$$p = d \sin \theta \quad (5)$$

$$\Delta = \frac{2\pi}{\lambda} p = \frac{2\pi f}{c} p \quad (6)$$

$$\theta = \frac{c\Delta}{2\pi f d} \quad (7)$$

$$x_0 = R \cos \theta \quad (8)$$

$$y_0 = \pm \sqrt{R^2 - x_0^2} \quad (9)$$

Çift antenli PDoA kullanılarak konum bir çember üzerinde kestirilebilir. Bu işlem yapılırken çemberin bir yarısı gözardı edilerek diğer yarısında konumlandırma yapılır. Şekil 2'de gösterildiği gibi iki adet PDoA kullanılarak 3B konumlandırma yapılabilir. Konum tahmini $[x, y, z]$ notasyonu ile belirtilecek şekilde, iki adet olası noktaya indirgenebilir: $[x_0, y_0, z]$ ve $[x_0, y_0, -z]$. Olası noktadaki z değeri $z = \sqrt{R^2 - x_0^2 - y_0^2}$ ile ifade edilebilir. Benzer bir şekilde, bu iki noktadan biri gözardı edilerek konum kestirimi yapılabilir.

IV. TEST VE PERFORMANS

Simülasyon test ve ölçümler için F450 tipi dönerkanat İHA gövdesi kullanılmış ve ölçümler bu model baz alınarak yapılmıştır. Alınan ölçümlerde, uzaklık verileri metre, açı verileri ise derece ($^\circ$) cinsindendir.

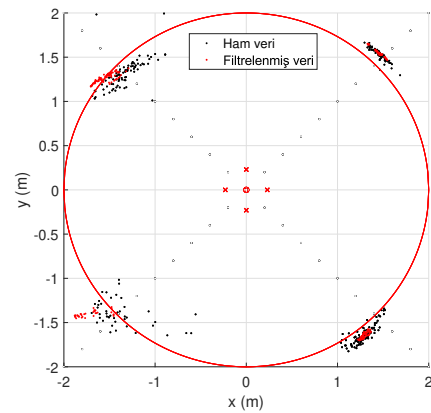
Dört referans çapalı sisteminin ölçümlerinde İHA'nın köşe noktalarına yerleştirilen çapalarla laboratuvarında 2 m uzaklıkta, aynı yükseklikteki ve farklı açılarda ölçümler alınmış, buna bağlı olarak da konumlandırma yapılmıştır. İkili faz farkı konumlandırmasında da benzer şekilde İHA'ya 2 m uzaklıkta, aynı yükseklikte ve farklı açılarda ölçümler alınmış ve konumlandırma yapılmıştır. Şekil 5'te dört referans çapalı sisteminin İHA platformu üzerinde yerleşimi gösterilmiştir.

Dört referans çapalı sistemde, CRAS simülasyonunun da öngördüğü üzere, aynı yükseklikteki çapalardan oluşan bu sistemin z koordinatının kestiriminde yüksek bir varyans olduğu gözlenmiştir. Bu sistem kullanılarak yapılan 45° , 135° , 225° ve 315° açılarında 2 m uzaklıktaki ölçümlerin üzerindeki hatalar, hareketli ortalama süzgeci ile düzeltilmiştir. Ancak z koordinatındaki büyük varyans, ölçümde büyük hataya neden olduğu için aynı ML kestirimcinin iki boyutlu (2B) versiyonu oluşturulmuştur. Bu 2B kestirimcinin, İHA üzerindeki çapaların (kırmızı x'ler) ve ilgili süzölmüş (kırmızı) ve süzölmemiş (siyah) versiyonları Şekil 6'da gösterilmiştir.

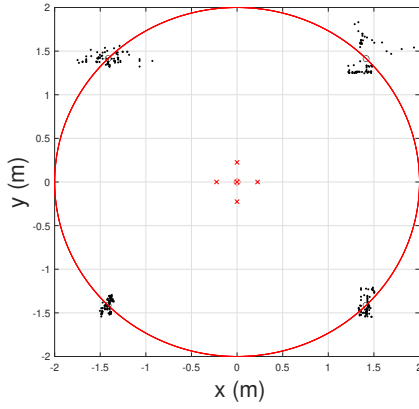
İkili faz farkı sisteminde elde edilen sonuçlar Şekil 7'de gösterilmiştir. Beklenildiği gibi PDoA önu ve arkasında (yarım çemberler), anten polarizasyonları gereği azalan ölçüm dışında, ayırt edememektedir. Sistemde elde edilen 225° ve 315° değerleri bastırılırken konumlandırmada bulunan y değerlerinin eksi işaretlisi alınmıştır. Ayrıca not edilmelidir ki, sistem kurulumu esasında yapılan hatalar sonucu oluşabilen sapma hatasını engellemek amacıyla sapma hatası giderimi yapılmıştır. Bu



Şekil 5: Dört referans çapalı sistem



Şekil 6: Dört referans çapalı konumlandırma sonuçları



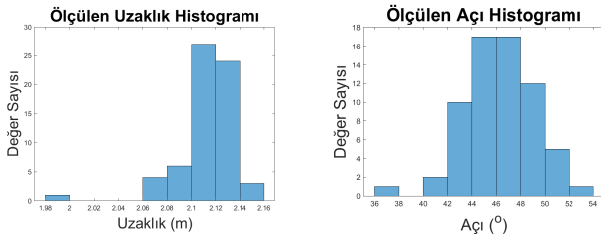
Şekil 7: İkili faz farkı konumlandırma sonuçları

ölçümlerde, çift PDoA kit beraber çalıştığında artan gürültüyü engellemek amacıyla sadece PDoA kitin kendisinin uyguladığı hareketli ortalama süzgecinden geçmiş veriler gösterilmiştir. Olası motor gürültü etkileri ihmal edilmiştir.

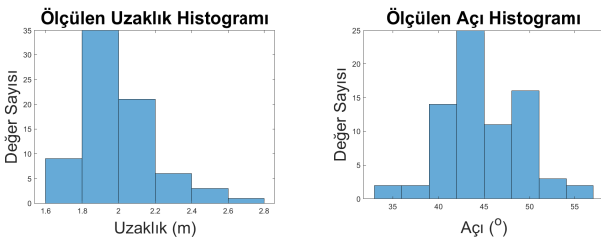
Şekil 8 ve 9, sırasıyla dört referans çapalı ve ikili faz farklı konumlandırma sistemleri ile elde edilen 2 m uzaklık ve 45° açı yönündeki konum kestirim sonuçlarını göstermektedir. Dört referans çapalı sistem için süzgeçten geçmemiş ölçümler kullanılmıştır. Ölçümlerde 2 m'deki yaklaşık uzaklık ve açı hata payları 20 cm ve 9° olarak bulunmuştur. Bu dağılım Gauss gürültüsü tarzında bir karaktere sahiptir.

V. SONUÇ

Bu çalışmada, UWB sinyaller esas alınarak 3B konumlandırma problemi için iki farklı yöntem önerilmiş ve bunların performansları incelenmiştir. Bu yöntemlerin ilki İHA üzerine dört adet çapa eklenmesi ve bu sayede 2B güvenilir bir konumlandırma yapılabilmesini sağlamaktadır. Bu yöntemde çapalar arasındaki uzaklık ve performansa etkileri incelenmiştir. Diğer yöntemde iki adet çift antenli UWB birimi ile



Şekil 8: Dört referans çapalı konumlandırma performansı



Şekil 9: İkili Faz Farkı konumlandırma performansı

PDoA yöntemi kullanılarak 3B konumlandırma yapılmıştır. Bu yöntemin sonucunda da yüksek doğrulukta 2B konumlandırma yapılmıştır. Bu yöntemlerin hibrit kullanımlarının da mümkün olabileceği düşünülmektedir. Söz konusu hibrit yöntemler, önerilen iki yöntemle birlikte bir barometre/altimetre ve iki yöntemin eşzamanlı olarak kullanılmasıyla oluşturabilir. Bu çalışmanın devamı olarak, önerilen yöntemler hibrit olarak kullanılıp konumlandırma performansının iyileştirilmesine ve gerçek sistemlerin üzerinden denenmesine ve geliştirilmesine devam edilecektir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Bilkent Üniversitesi Sanayi Odaklı Bitirme Projeleri kapsamında, HAVELSAN A.Ş. danışmanlığı ve desteği ile yürütülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] J. M. Zogg, "GPS: Essentials of Satellite Navigation, Compendium. Theory and Principles of Satellite Navigation, Overview of GPS/GNSS Systems and Applications," *U-Blox*, 2009.
- [2] D. B. Jourdan, D. Dardari, M. Z. Win, "Position error bound for UWB localization in dense cluttered environments," *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, vol. 44, no. 2, pp. 613–628, April 2008, doi: 10.1109/TAES.2008.4560210.
- [3] S. Gezici, H. Kobayashi, H. V. Poor, "Nonparametric nonlinear-of-sight identification," *IEEE 58th Vehicular Technology Conf. VTC 2003-Fall (IEEE Cat. No.03CH37484)*, 2003, pp. 2544–2548, vol.4, doi: 10.1109/VETECF.2003.1285996.
- [4] A. I. Mourikis, S. I. Roumeliotis, "Performance analysis of multirobot cooperative localization," *IEEE Trans. Robotics*, vol. 22, no. 4, pp. 666–681, Aug. 2006, doi: 10.1109/TRO.2006.878957.
- [5] F. Shan, J. Zeng, Z. Li, J. Luo, W. Wu, "Ultra-Wideband Swarm Ranging," *IEEE Conf. Computer Communications (INFOCOM)*, 2021, doi: 10.1109/INFOCOM42981.2021.9488717.
- [6] J. P. Queralta, C. Martínez Almansa, F. Schiano, D. Floreano, T. Westerlund, "UWB-based system for UAV localization in GNSS-denied environments: characterization and dataset," *IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2020, pp. 4521–4528, doi: 10.1109/IROS45743.2020.9341042.
- [7] J. Li, Y. Bi, K. Li, K. Wang, F. Lin, B. M. Chen, "Accurate 3D localization for MAV swarms by UWB and IMU fusion," *IEEE 14th Int. Conf. Control and Automation (ICCA)*, pp.100–105, 12–15 June 2018, Anchorage AK, U.S.A., doi: 10.1109/ICCA.2018.8444329.
- [8] S. Gezici, Z. Tian, G. Giannakis, H. Kobayashi, A. Molisch, H. Poor, Z. Sahinoglu, "Localization via ultra-wideband radios: a look at positioning aspects for future sensor networks," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 22, no. 4, pp. 70–84, July 2005, doi: 10.1109/MSP.2005.1458289.
- [9] H. Chen, T. Ballal, N. Saeed, M.-S. Alouini, T. Y. Al-Naffouri, "A joint TDOA-PDOA localization approach using particle swarm optimization," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 9, no. 8, pp. 1240–1244, Aug. 2020, doi: 10.1109/LWC.2020.2986756.
- [10] J. Schroeder, S. Galler, K. Kyamakya, "A low-cost experimental ultra-wideband positioning system," *IEEE Int. Conf. Ultra-Wideband*, 2005, pp. 632–637, doi: 10.1109/ICU.2005.1570062.
- [11] M. Kök, B. Barshan, "2D simultaneous localization and mapping for unmanned aerial vehicles," *IEEE 16th Signal Processing, Communication and Applications Conf.*, 2008, doi: 10.1109/SIU.2008.4632709.
- [12] S. Gezici, H. Kobayashi, H. V. Poor, A. F. Molisch, "Performance evaluation of impulse radio UWB systems with pulse-based polarity randomization," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 53, no. 7, pp. 2537–2549, July 2005, doi: 10.1109/TSP.2005.849197.
- [13] I. Dotlic, A. Connell, H. Ma, J. Clancy, M. McLaughlin, "Angle of arrival estimation using Decawave DW1000 integrated circuits," *14th Workshop on Positioning, Navigation and Communications (WPNC)*, 2017, doi: 10.1109/WPNC.2017.8250079.