

Akıllı Tarım Uygulamalarında Robotik Kablosuz Sensör Ağlarında Çoklu Robot Görev Tahsisi

Multi-Robot Task Allocation in Robotic Wireless Sensor Networks in Smart Agricultural Applications

Ömer Melih Gül

Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
Bahçeşehir Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

{omermelih.gul}@bau.edu.tr

Özetçe

Bu bildiri, akıllı tarım uygulamalarında bir baz istasyonu ve birkaç robot kümesi içeren bir robot ağ kümesinde enerji farkında çok robotlu görev tahsisi (ÇRGT) problemini incelemektedir. Her turda M görev ve $M + 1$ robot bulunur. Bir robot küme başkanı seçilir ve o turdaki her robota bir görev verir. Kalan M robotlarından veri toplar ve bunu baz istasyonuna gönderir. Bu çalışma, her bir düğümün seyahat mesafesi, her görev için gereken enerji, pil seviyesi ve enerji toplama kapasitelerini göz önünde bulundurarak M görevlerini kalan M robotlarına optimum veya ideale yakın olarak tahsis eder. Bu bildiri, makine öğrenmesi tabanlı yeni bir algoritma tanıtmaktadır. Performansı, aynı sayıda görev içeren 5-robotlu senaryo için farklı enerji hasatlama yöntemleri altında incelenmiştir.

Abstract

This paper studies an energy-aware multi-robot task-allocation (MRTA) problem in a robot network cluster with a base station and several clusters of robots in smart agricultural applications. Each round has M tasks and $M + 1$ robots. A robot is elected cluster head and assigns one duty to each robot in that round. It gathers data from the remaining M robots and sends it to the BS. This work allocates M tasks to the remaining M robots optimally or near ideally by considering each node's distance to travel, energy required for each task, battery level, and energy-harvesting capabilities. This paper introduces a new machine learning-based algorithm. Its performance is examined under different energy-harvesting methods for 5-robot scenario with the same number of tasks.

1. Giriş

Geçmişte, tarım işçileri yabancı otları tohum ekmeden önce doğrudan tespit ederdi. İnsan emeği bugün kıttır. Tarım işçileri başka tarlalara taşınırken gıda üretimi zarar gördü. Uzmanlar, nüfus arttıkça, arazi küçüldükçe ve doğal kaynaklar azaldıkça

kendi kendine yeten bir sistem talep eden hassas ve akıllı tarıma daha fazla odaklanıyor. Algoritmaları birleştirmek, sistem genelinde nesnelerin internetini ve gözetim sistemini etkinleştirir. Bitkiler, toprağı ve çevresini bilirler. Melez tohumlar ve yapay kompostlar verimliliğı artırır. İklim, su, tohumlar ve kompostlar çiftçiliğı etkiler. İklim kontrol edilemez iken hava suyu dağıtır. Tohum ve gübre seçimi yönetilebilir. Bu da akıllı tarıma olan ihtiyacı ortaya koyar [1].

Kablosuz sensör ağları (KSA), tarımsal gözetimi, çevre gözetimi, trafik gözetimi, hava trafik kontrolü, fiziksel güvenlik, endüstriyel ve üretim otomasyonu, sağlık hizmetleri, akıllı şehirler ve dağıtılmış robotlar, kablosuz bağlantılar üzerinden akıllı, ucuz ve küçük boyutlu sensörler kullanır. [2, 3].

Birçok düşük maliyetli, pille çalışan kablosuz düğüm, ortamlarını KSA ile izler. Kablosuz sensörler ve robot ağları artık zengin kaynaklara sahip mobil robotları içeriyor. Tehlikeli veya seyrek ortamlarda bile robotlar, otomatikleştirilmiş görevleri insan yardımı olmadan tamamlayabilir. Statik sensör düğümleri, volkanik ortamlardaki gaz konsantrasyonunu, sıcaklığı ve diğer önemli parametreleri ölçebilir. Bunlar büyük ölçüde değıştiriginde acil bir olay oluşur. Sismometreleri, termal kameraları vb. olan bir robot olayları analiz etmelidir [4].

Son yıllarda, tehlikeli bölgeleri temizlemek, tarlaları hasat etmek, alan keşfi, savaş izleme, arama ve kurtarma görevleri ve daha fazlası için robot konuşlandırılması üzerinde çalışıldı. Karmaşık etki alanları başarısızlığa karşı hassastır ve tamamlanması yavaştır, bu durumda tek robot yerine çok robotlu sistemler karmaşık görevleri çözmede daha iyidir [5].

Robotik ve KSA'ler 20 yıldır iyi bir şekilde incelenmiştir. Bununla birlikte, bu bilimsel alanlar keşfedilmemiş birçok potansiyel ve araştırma yönü sağlar. Robotlar ve kablosuz sensörler yakın zamana kadar ağ düğümleri idi. KSA robotik uygulamaları incelenmiştir [6]. Robotlar ve kablosuz sensörler birbirini tamamlıyor. Robotik ve kablosuz sensör ağları (RKSA) tarım, çevre, ulaşım, sağlık, hava tahmini, otonom sürüş, maddencilik, arama kurtarmada kullanılmaktadır [7, 8].

Çok robotlu sistemler, bağımsız çalışabilmek için çok robotlu görev tahsisi (ÇRGT) problemini verimli bir şekilde çözmelidir. Temel doğrusal atama problemi, tüm etmenlerin toplam getirisini maksimize eden (veya maliyeti en aza indiren) görev-

lere bire bir etmen ataması bulma şeklindedir [9].

Otonom keşif [9], lojistik [10], insansız arama ve kurtarma [11], keşif [12] vb. ÇRGT problemini uygulayabilir. ÇRGT'nin NP-zor olduğu kabul edilmektedir [13, 14]. Bu nedenle, önerilen çözümler zamansal karmaşıklık-ters özelliklere sahiptir. Araştırmamız, tarımsal uygulamaları, çoklu robot sistemlerini ve iş dağılımı düşünülerek tasarlanmıştır.

Enerji verimliliği, çok robotlu sistemin ağ ömrünü artırır. Bu bildiri, her bir düğümün kat ettiği mesafeyi, pil seviyesini ve tahmin edilen toplanan enerjiyi değerlendiriyor.

1.1. Ana Katkılar

Bu makalenin temel bulguları şunlardır:

- Bildiğimiz kadarıyla, bu bildiri tarım uygulamalarında enerji hasatlayan robot düğümlerini kullanan görev tahsisi üzerine yapılan ilk çalışmadır.
- ÇRGT optimizasyonumuz, her bir düğümün görevine olan mesafesini, görevi tamamlamak için gereken enerjiyi, pil seviyesini ve enerji hasatlama yeteneklerini tahmin eden bir yaklaşım sergiler.
- Bu bildiri de makina öğrenmesi tabanlı yeni bir ÇRGT politikası önerilmektedir.

1.2. Teşkil

Bu bildiri şu şekilde devam etmektedir. Bölüm 2 ilgili çalışmaları sunar. Bölüm 3 sistem modelini ve problemini tanıtmaktadır. Bölüm 4'te, yeni ÇRGT algoritması sunulmaktadır. Bölüm 5, aynı sayıda göreve sahip beş ve 10 robot durumu için farklı enerji toplama yöntemleri altında önerilen ÇRGT algoritmalarını değerlendirir. 6. Bölüm gelecekteki çalışmaları özetlemekte ve önermektedir.

2. Literatür

Bu bölümde son yıllarda gelişen ÇRGT literatüründeki ilgili çalışmalara değinilmektedir.

[15]'e göre Macar yaklaşımı, çok robotlu bir sistemdeki temel çok robotlu görev tahsisi (ÇRGT) sorununa optimal bir merkezi çözümdür. Bu en iyi çözüm, merkezi yaklaşım sınırlamalarına sahiptir. Dinamik değişikliklere yavaş tepki verirler. Bu nedenle, daha dağınık algoritmalar önerilmektedir.

[16] bir robot sürüsü ÇRGT problemini inceledi. Bu sistem, her robotun tek bir görevi yapabileceğini ve görevle aynı sayıda robota sahip olduğunu varsayar. Bu araştırma, merkezi ve dağıtılmış algoritmalar arasında iyi bir değiş tokuş sunduğu için robotların görevler için teklif vermesine izin veren, dağıtılmış ihale tabanlı bir ÇRGT algoritması önerir.

[17], çok robotlu bir gönderme problemini inceler. Her robot, tur başına bir veya daha fazla etkinliği ziyaret edebilir. Yazarlar ayrıca, sensörlerin olayları fark ettiği ve bunları robotlara bildirdiği dağıtılmış bir kablosuz sensör ağı senaryosunu da araştırdı. İki robot-olay çifti arasındaki ikili değiş tokuşlar, ikili mesafe tabanlı bir eşleştirme tekniği kullanarak yol uzunluğunu azaltır.

[18]'da, çok robotlu bir sistem için görevlerin ayrık gruplar oluşturduğu ve her robotun hem görev içinde hem de her görev içinde başarabileceği iş sayısında bir üst sınıra sahip olduğu

dağıtılmış bir çevrimdışı görev atama problemi incelenmiştir. Amaç, robotları görevlere atayarak tüm robot getirilerinin toplamını eniyileştirmektir. Yazarlar, merkezileştirilmiş, merkezi olmayan ve dağıtılmış açık artırmaya dayalı algoritmalar önermektedir.

[19]'da, ayrık değişkenler kullanan çoklu, doğrusal olmayan kriterlere sahip tek robotlu bir görev, robot, süresi uzatılmış atama ve ÇRGT sorunu formüle edilir. ÇRGT yaklaşımları, seyahat mesafesini, görev yürütme süresini ve enerji fizibilitesini aynı anda optimize eder. Algoritmalar, yalnızca termogüneş enerjisi santrallerine değil, doğrusal olmayan bir maliyet fonksiyonuna sahip herhangi bir çok kriterli ÇRGT problemine uygulanabilir. GA, daha büyük problemler için küresel optimalliğe daha hızlı ulaşır. Hesaplama kapasitesi göz önünde bulundurularak, parametre ayarlaması basitçe doğruluk ve hesaplama süresi arasında değiş tokuş yapılabilir.

[20], programa bağlı bir ÇRGT problemini dikkate alır. Kombinatoriyal eniyileştirme NP-zordur. Bu yaklaşım, ÇRGT'yi dağıtmak için alt modüllerliği ve görev örneklemesini kullanır. Analitik olarak, polinom zamanında monoton alt modüller için optimal çözümlerin yarısını ve monoton olmayan alt modüller için dörtte birini garanti edebilir. Performansını değerlendirmek ve teorik analizleri doğrulamak için iki ÇRGT durumu simüle edilir. Çok daha az işleme karmaşıklığı ile monoton ve monoton olmayan durumlarda en son teknoloji yöntemlerden daha iyi performans gösterdiğini gösteriyorlar.

3. Sistem Modeli ve Problem Tanımı

Bu çalışma, bir baz istasyonu ve çok sayıda mobil robotik sensör kümesi içeren bir robot ağ kümesini incelemektedir. S , küme robot dizin kümesidir. Bu kümede $M + 1$ robot ve her turda M görev bulunur. Küme başkanı olarak bir robot seçilir. $H(t) = i$, eğer i robotu t turundaki küme başı ise. Küme başı robotu, çoklu robot sistemindeki kalan M robotlarından verileri toplar ve baz istasyonuna gönderir. $E_i^h(t)$, robot i tarafından TS t 'de toplanan enerjidir ve $B_i(t)$, robotun pilinde kalan enerjidir.

Enerjiye duyarlı çoklu robot görev tahsisi, eşleşen bir gönderme sorunudur. (Eşleştirme gönderimi, bir robottan bir göreve kadardır). $M - to - M$ iş tahsisi (veya eşleştirme) algoritmaları aşağıdaki gibi tanımlanır.

Tanım 1. Bir $M - to - M$ görev tahsisi algoritması, t turundaki i robotuna bir j görevi atar. t turu için bu eşleştirme işlevi şöyledir: $\pi(i, t) : i \rightarrow j$, burada $i \in S - \{H(t)\}$ 'dir ve $j \in \{1, \dots, M\}$ 'dir.

Çok robotlu görev tahsisi problemi, çoğu eşleşen gönderme yönteminin aksine, robotun pil enerjisini dikkate alır. Bir robot, "olay"ına veya "hedefine" ulaştıktan sonra bir görevi yapacak kadar enerjiye sahip değilse, o atanmamalıdır.

4. Önerilen Makina Öğrenmesi (MÖ)-tabanlı ÇRGT Algoritması

Bu bölümde, ÇRGT problemini, her düğümün kat ettiği mesafeyi, pil seviyesini, her aktivite için gereken enerjiyi ve tahmini hasat edilen enerjiyi dikkate alarak çözülür. Düğüm enerji hasadını tahmin edebilir. Macar algoritma [15] tabanlı EH ve Göreve duyarlı MÖ-tabanlı ÇRGT Yaklaşımı. Optimum Macar algoritması, M robotları için $O(M^3)$ hesaplama karmaşıklığına

sahiptir.

Önerilen yöntem, Algoritma 1'te verilmiştir.

Algorithm 1 Makina Öğrenmesi (MÖ)-tabanlı Çoklu Robot Görev Tahsisi (ÇRG T) Algoritması

Başlangıç: The index set of tasks is $T = \{T_1, \dots, T_M\}$.

Algoritma:

(1) Her robotu bir görevle eşleştirin.

for $i = 1 : M$

(2) Her robot i için, robotta eşleştirilen görev yerine ulaşmaya kadar hasatlanan enerjiyi makina öğrenmesi (MÖ) ile tahmin edin.

(3) Her robot i için, her robot tarafından katedilen mesafenin tamamı ve pil seviyesi, her görevi gerçekleştirmek için gereken enerji ve her robotta hasatlanan enerjinin MÖ-tabanlı tahmini değerleri ile toplam tahmini enerji harcaması maliyetlerini hesaplayın.

(4) Her robot i için diğer robotların maliyetlerine bakın.

(5) İki robot birbiriyle görev değiştirdiğinde maliyet düşerse.

(6) Robotlar atanan görevlerini değiştirir.

(7) Aksi takdirde robotlar kendilerine atanan görevleri değiştirmezler.

end

Enerji Hasatlama sürecini tahmin için birçok algoritma kullanılmaktadır [21], bu bildiri makina öğrenmesi tabanlı bir ÇRG T yaklaşımı önerir.

5. Sayısal Sonuçlar

Bu bölümde EH ve Göreve duyarlı MÖ-tabanlı ÇRG T'nin başarımı, [22] makalesinde önerilen ve en iyi başarılı EH ve Göreve duyarlı ÇRG T algoritması ile karşılaştırılacaktır.

Sayısal deneyler, bir robotun atandığı görevin konumuna $v=10$ m/s hızla hareket edebildiği $1000m \times 1000m$ 'lik bir alanda gerçekleştirilmiştir. Başlangıçta her düğüm $B_i=600$ mJ enerji depolayabilen dolu bir bataryaya sahiptir.

5.1. Bağımsız ve Özdeş Dağıtılmış (BÖD) EH Süreci

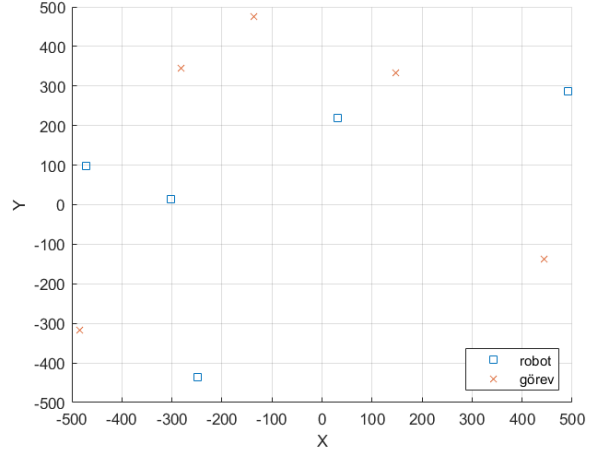
Bu alt bölüm, BÖD EH süreci altında 5 robot -5 görev durumu vakayı ele alır. Her düğümdeki süreç her düğüm için farklı BÖD şeklinde oluşturulur. Bu bölüm, 5 BÖD EH robotları ve beş görevli bir vakayı ele alır.

Şekil 1, 5 BÖD EH robot düğümleri ve $1000m \times 1000m$ alandaki 5 görevin konumlarını göstermektedir.

Şekil 1'de 5 BÖD EH robot düğümleri şu şekilde verilir: $(\xi_1(0), \xi_2(0), \xi_3(0), \xi_4(0), \xi_5(0)) = ((-472, 99), (-302, 15), (31, 219), (492, 287), (-248, -437))$.

Şekil 1'de 5 BÖD görevlerin konumları şu şekilde verilir: $(\xi(1, 1), \xi(2, 1), \xi(3, 1), \xi(4, 1), \xi(5, 1)) = ((-282, 346), (-137, 475), (148, 334), (443, -137), (-484, -317))$.

Şekil 2, 5 BÖD'nin pillerinde kalan toplam enerjiyi gösterir. BÖD EH süreçlerine sahip 5 robot olduğundan, düğümlerin pillerinde kalan toplam enerji başlangıçta $5 \times 600 = 3000$ mJ'dir (0. tur olarak gösterilir).



Şekil 1: 5 BÖD EH robot düğümleri ve beş görevin konumları, sırasıyla "kare" ve "çapraz" işaretçiler ile temsil edilir.

Şekil 2'den aşağıdaki gözlemleri yapabiliriz. İlk üç turda, EH ve Göreve duyarlı MÖ-tabanlı ÇRG T, EH ve Göreve duyarlı ÇRG T algoritmasına göre biraz daha iyi performans gösterir (%4 daha fazla enerji depolar). 4. turda, EH ve Görev farkında olan ÇRG T da EH ve Görev farkında olan ÇRG T'dan daha iyi performans göstermeye başlar. Özellikle 7. turda, EH ve Görev farkında MÖ-tabanlı ÇRG T, EH ve Görev farkında ÇRG T ile karşılaştırıldığında en iyi görece performansını (%10 daha fazla) gösterir. Ek olarak, EH ve Görev farkında MÖ-tabanlı MRTA, 10. turdaki EH ve Görev farkında MRTA ile karşılaştırıldığında en iyi görece performansını (%15 daha fazla) gösterir.

5.2. Markov EH Süreci

Bu alt bölümde, Markov EH süreci altında 5 robot -5 görev durumu vakayı ele alacağız. Her düğümdeki süreç her düğüm için farklı Markov şeklinde oluşturulur. Bu bölümde, 5 Markov EH robotları ve beş görevli bir vakayı ele alacağız.

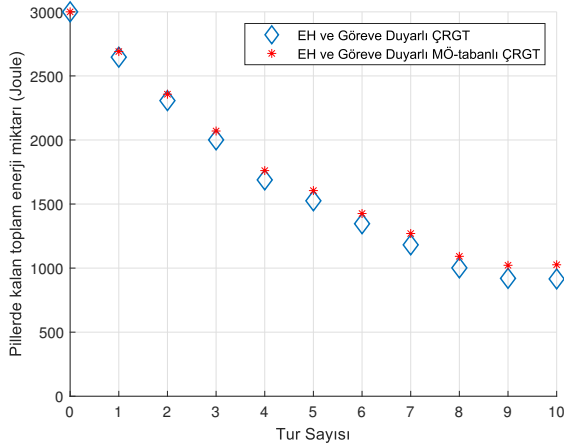
Şekil 3, 5 i.i.d. EH robot düğümleri ve $1000m \times 1000m$ alandaki beş görevin konumlarını göstermektedir.

Şekil 3'de beş i.i.d. EH robot düğümleri şu şekilde verilir: $(\xi_1(0), \xi_2(0), \xi_3(0), \xi_4(0), \xi_5(0)) = ((477, 175), (368, -282), (-468, 99), (-37, -329), (-431, 482))$.

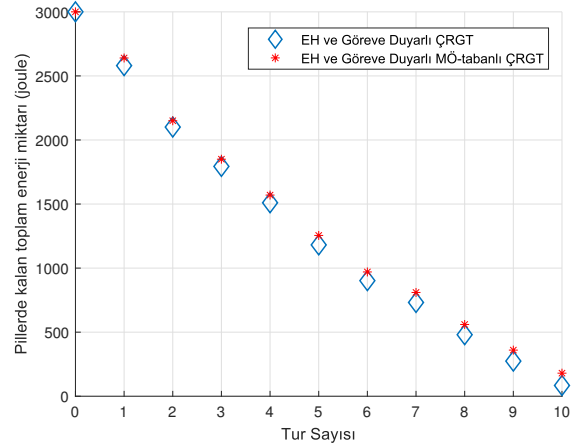
Şekil 3'de beş i.i.d. görevlerin konumları şu şekilde verilir: $(\xi(1, 1), \xi(2, 1), \xi(3, 1), \xi(4, 1), \xi(5, 1)) = ((-373, 457), (56, 123), (106, 16), (136, 20), (-117, -195))$.

Şekil 4, 5 Markov EH süreçleri altında pillerde kalan toplam enerjiyi gösterir. Beş robot olduğundan, düğümlerin pillerinde kalan toplam enerji başlangıçta $5 \times 600 = 3000$ mJ'dir (0. tur olarak gösterilir).

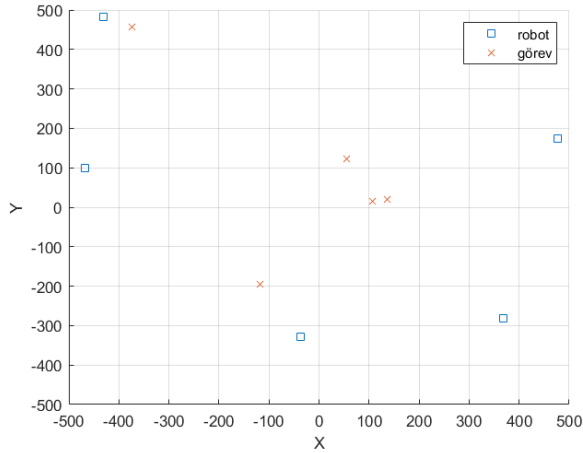
Şekil 4'den aşağıdaki gözlemleri yapabiliriz. İlk üç turda, EH ve Göreve duyarlı MÖ-tabanlı ÇRG T, EH ve Göreve duyarlı ÇRG T algoritmasına göre biraz daha iyi performans gösterir (daha fazla enerji depolar). 4. turda, EH ve Görev farkında olan MÖ-tabanlı ÇRG T da EH ve Görev farkında olan ÇRG T'dan %8 daha iyi performans göstermeye başlar. Özellikle 7. turda,



Şekil 2: BÖD EH süreçleri altındaki tur sayısına karşı 5 BÖD EH robot düğümlerin pillerde kalan toplam enerji



Şekil 4: Markov EH süreçleri altındaki tur sayısına karşı 5 Markov EH robot düğümlerin pillerde kalan toplam enerji



Şekil 3: 5 Markov. EH robot düğümleri ve beş görevin konumları, sırasıyla "kare" ve "çapraz" işaretçiler ile temsil edilir.

EH ve Göreve Duyarlı MÖ-tabanlı ÇRGT, EH ve Göreve Duyarlı ÇRGT ile karşılaştırıldığında en iyi görelî performansını (%18 daha fazla) gösterir. Ek olarak, EH ve Göreve duyarlı MÖ-tabanlı ÇRGT, 10. turdaki EH ve Göreve duyarlı ÇRGT ile karşılaştırıldığında en iyi görelî performansını (%80 daha fazla) gösterir.

6. Sonuç

Günümüzde insan emeği bugün kıttr. Tarım işçileri başka tarlalara taşınırken gıda üretimi zarar görür. Uzmanlar, nüfus arttıkça, arazi küçüldükçe ve doğal kaynaklar azaldıkça kendi kendine yeten bir sistem talep eden hassas ve akıllı tarıma daha fazla ihtiyaç duymaktadır.

Bu bildiri tarımsal uygulamalarda küme tabanlı çok robotlu görev tahsisi (ÇRGT) problemini inceler. Her turda, küme başı olmayan her robot bir görevi yerine getirir. Bu robot görev tah-

sis sistemi, mesafe ve enerjiyi birleştirir. Bire bir eşleşen gönderim sorundur. Bu çalışmada, farklı enerji hasatlam süreçleri ve robot sayıları (aynı miktarda görevle) için yeni bir ÇRGT Yaklaşımını önerilmekte ve performansı incelenmektedir. Bu yaklaşımın önceki yaklaşıma göre daha verimli bir performans sergilediği görülmüştür.

7. Kaynakça

- [1] P. Samuel S., K. Malarvizhi, S. Karthik and M. Gowri S.G., "Machine Learning and Internet of Things based Smart Agriculture," 2020 6th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS), Coimbatore, India, 2020, pp. 1101-1106.
- [2] Chong, C.-Y.; Kumar, S.P. Sensor networks: Evolution, opportunities, and challenges. Proc. IEEE 2003, 91, 1247–1256.
- [3] Akyildiz, I.F.; Su, W.; Sankarasubramanian, Y.; Cayirci, E. A survey on sensor networks. IEEE Commun. Mag. 2002, 40, 102–114.
- [4] Lukic, M.; Barnawi, A.; Stojmenovic, I. Robot Coordination for Energy-Balanced Matching and Sequence Dispatch of Robots to Events. IEEE Trans. Comput. 2015, 64, 1416–1428.
- [5] Gautam, A.; Thakur, A.; Dhanania, G.; Mohan, S. A distributed algorithm for balanced multi-robot task allocation. In Proceedings of the 2016 11th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS), Roorkee, India, 3–4 December 2016; pp. 622–627.
- [6] Shue, S.; Conrad, J. A Survey of Robotic Applications in Wireless Sensor Networks. In Proceedings of the IEEE Southeastcon 2013, Jacksonville, FL, USA, 4–7 April 2013; pp. 1–5.
- [7] Ryu, J.H.; Irfan, M.; Reyaz, A. A review on sensor network issues and robotics. J. Sens. 2015, 2015, 1–14.

- [8] Ghosh, P.; Gasparri, A.; Jin, J.; Krishnamachari, B. Robotic wireless sensor networks. In *Mission-Oriented Sensor Networks and Systems: Art and Science. Studies in Systems, Decision and Control*; Springer: Cham, Switzerland, 2019; Volume 164.
- [9] Dasgupta, P. Multi-robot task allocation for performing cooperative foraging tasks in an initially unknown environment. In *Innovations in Defence Support Systems-2: Socio-Technical Systems*; Jain, L.C., Aidman, E.V., Abeynayake, C., Eds.; Springer: Berlin, Germany, 2011; pp. 5–20.
- [10] Lim, S.; Rus, D. Stochastic motion planning with path constraints and application to optimal agent, resource, and route planning. In *Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Saint Paul, MN, USA, 14–18 May 2012; pp. 4814–4821.
- [11] Jones, E.G.; Dias, M.B.; Stentz, A. Time-extended multi-robot coordination for domains with intra-path constraints. *Auton. Robot.* 2011, 30, 41–56.
- [12] Lenagh, W.; Dasgupta, P.; Munoz-Melendez, A. A spatial queuing based algorithm for multi-robot task allocation. *Robotics* 2015, 4, 316–340.
- [13] Gerkey, B.P.; Mataric, M.J. A formal analysis and taxonomy of task allocation in multi-robot systems. *Int. J. Robot. Res.* 2004, 23, 939–954.
- [14] Hojda, M. Task allocation in robot systems with multi-modal capabilities. *IFAC-PapersOnLine* 2015, 48, 2109–2114.
- [15] Kuhn, H.W. The hungarian method for the assignment problem. *Nav. Res. Logist. Q.* 1955, 2, 83–97.
- [16] Trigui, S.; Koubaab, A.; Cheikhrouhou, O.; Yousseff, H.; Bennaceur, H.; Sritig, M.F.; Javed, Y. A Distributed Market-Based Algorithm for the Multi-Robot Assignment Problem. *Procedia Comput. Sci.* 2014, 32, 1108–1114.
- [17] Lukic, M.; Stojmenovic, I. Energy-balanced matching and sequence dispatch of robots to events: Pairwise exchanges and sensor assisted robot coordination. In *Proceedings of the 10th IEEE 10th International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems*, Hangzhou, China, 14–16 October 2013; pp. 249–253.
- [18] Luo, L.; Chakraborty, N.; Sycara, K. Provably-Good Distributed Algorithm for Constrained Multi-Robot Task Assignment for Grouped Tasks. *IEEE Trans. Robot.* 2015, 31, 19–30.
- [19] Martin, J.G.; Frejo, J.R.D.; García, R.A.; Camacho, E.F. Multi-robot task allocation problem with multiple nonlinear criteria using branch and bound and genetic algorithms. *Intel. Serv. Robot.* 2021, 14, 707–727.
- [20] Shin, H.S.; Li, T.; Lee, H.I.; Tsourdos, A. Sample greedy based task allocation for multiple robot systems. *Swarm Intell.* 2022, 16, 233–260.
- [21] Ashraf, N.; Faizan, M.; Asif, W.; Qureshi, H.K.; Iqbal, A.; Lestas, M. Energy management in harvesting enabled sensing nodes: Prediction and control. *J. Netw. Comput. Appl.* 2019, 132, 104–117.
- [22] Gul OM. Energy Harvesting and Task-Aware Multi-Robot Task Allocation in Robotic Wireless Sensor Networks. *Sensors.* 2023; 23(6):3284.