

Bulanık Mantık Kullanılarak Çoklu Robot Sistemleri İçin Güvenilirlik Tabanlı Görev Paylaşım Analizi

Reliability Based Task Allocation Analysis for Multi-Robot Systems by Using Fuzzy Logic

Muhammed Oguz TAS¹, Ugur YAYAN¹, Hasan Serhan YAVUZ¹, Ahmet YAZICI²

¹Elektrik ve Elektronik Muhendisliği Bölümü, Eskisehir Osmangazi Üniversitesi, Eskisehir, Türkiye
moguztas@hotmail.com, uguryayan@gmail.com, hsyavuz@ogu.edu.tr

²Bilgisayar Muhendisliği Bölümü, Eskisehir Osmangazi Üniversitesi, Eskisehir, Türkiye
ayazici@ogu.edu.tr

Özetçe—Robotik sistemler, insanların yapmasının tehlikeli veya zor olduğu birçok alanda kullanılmaktadır. Endüstri 4.0 ile birlikte, otonom robotların önemi artmış ve robotik sistemlerin daha uzun süre problemsiz çalışması için gerekli olan güvenilirlik vb. kavramlar öne çıkmıştır. Bu çalışmada, bulanık mantık kullanılarak robotlar arasındaki görev paylaşımı analizi robotların güvenilirliği dikkate alınarak yapılmıştır. Bulanık çıkarım sistemi yardımıyla, taşınan yük miktarları ve taşıma mesafeleri kullanılarak güvenilirlik tabanlı görev paylaşımının sonucuna karar verilmiştir. Çalışmada, görev paylaşımlarının yakınlığa ve güvenilirliğe göre yapılması durumları analiz edilip karşılaştırılmıştır. Çalışmalar sonucunda, güvenilirlik tabanlı görev paylaşımı sonucu ortaya çıkan sistem güvenilirliği değerinin, yakınlık tabanlı görev paylaşım sonucu ortaya çıkan sistem güvenilirliği değerinden yüksek olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler—güvenilirlik; endüstri 4.0; görev paylaşımı; gürbüz sistem; çoklu robot sistemi

Abstract—Robotic systems are used many areas where it is dangerous or difficult for people to do. The importance of autonomous robots increased with the Industry 4.0, and the concept of reliability needed more attention for long term operability of robotic systems. In this study, reliability based task allocation analysis is performed for robots by using fuzzy logic. With the help of fuzzy inference system, the result of reliability based task allocation are obtained using the amount of carried load and load carrying distances. In the study, cases of task allocation based on nearest and reliability were analyzed and compared. Experimental results showed that, the system reliability that occurs with reliability based task allocation is higher than the system reliability that occurs with nearest based task allocation.

Keywords—reliability; industry 4.0; task allocation; robust system; multi robot system

I. GİRİŞ

Gelişen teknoloji ile birlikte otonom robot sistemleri çok farklı sektörlerde yerini almaya başlamıştır. Robotik sistemler, verimliliği ve iş güvenliğini arttırmak için çeşitli alanlarda, özellikle ürün taşıma ve depolamada, kullanılmaktadırlar. İlk olarak tüm işlevleri uzaktan bir operatör yardımıyla kontrol edilen mobil robotlar, insanların bulunmasının tehlikeli veya zor olduğu birçok uygulamada kullanılmaktadırlar. Hızla gelişen teknoloji sayesinde, Endüstri 4.0'da akıllı fabrikaların kurulması fikri iyice benimsenmiştir. Bu durum operatör yardımıyla kontrol edilen veya belli yolları izleyen robotların yerine, otonom kontrol sağlayan robotik sistemlere olan gereksinimi ortaya çıkarmıştır. Bu sistemlerin uzun vadeli kesintisiz çalışması için, robotların güvenilirlik değerlerinin bilinmesi ve buna göre kendileri arasında görev paylaşım kararlarının alınması gerekmektedir.

Mobil robotların güvenilirliği oldukça popülerleşen bir kavram olmasına rağmen, özellikle ülkemizde hala yeterli çalışma yapılmamaktadır. Çalışma [1]'de evarobot için güvenilirlik analizi yapılmış, evarobot'un sıcaklık ve yük değişkenleri altında güvenilirliğinin değişimi gösterilmiştir. Çalışma [2]'de çoklu robot sistemlerinin değişik güvenilirlik parametreleri, Gerçek Kodlanmış Genetik Algoritma ve Bulanık Lambda-Tau metodları yardımıyla incelenmiştir. Çalışma [3]'te çoklu robotik sistemler için görev paylaşımı yapılmış ve tamir edilebilir robot ekipleri için görev tamamlama olasılıkları analitik olarak tahmin edilmiştir. Çalışma [4]'te çoklu robot sistemlerinin görev paylaşımında seçilen plan ile optimal plan olan, robot hatalarının ve olası hata sonucu devreye sokulacak yedek görev paylaşım planının göz önüne alındığı plan, karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmada, çoklu robot sistemleri için bulanık mantık ve güvenilirliği etkileyen parametreler kullanılarak, robotlar

arasındaki görev paylaşımı yapılmıştır. Daha sonra her bir robotun görev sonu güvenilirliği bulunmuştur. Son olarak robotik sistemin toplam güvenilirliği elde edilmiş, klasik görev paylaşımı durumu ile karşılaştırılmıştır. 2.bölümde tanımlamalar verilmiş, 3.bölümde çalışma ortamı anlatılmıştır. 4.bölümde hem güvenilirlik tabanlı hem de klasik tabanlı olarak görev paylaşımı ile robotların ve sistemin güvenilirliklerinin hesaplanması süreci anlatılmıştır. 5.bölümde test sonuçları verilmiş ve 6.bölümde çalışma yorumlanmıştır.

II. TANIMLAMALAR VE ÖN ÇALIŞMALAR

Güvenilirlik, bir aygıtın, bir sistemin veya bir işlemin kendisine öngörülen görevi hatasız olarak, belli bir çerçeve içerisinde ve tanımlanan zaman aralığında doğru bir şekilde yerine getirme olasılığıdır [5]. Tasarlanan sistemde kullanılan kavramlar ve formüller [1] ve [6] kaynaklarındaki bilgilere göre verilmiştir.

Güvenirlilik literatüründe sıklıkla kullanılan bir kavram olan hata oranı $h(t)$, belli zaman aralığında hatanın anlık değişimini ifade eder ve saatte yapılan hataya karşılık gelir. Güvenirlilik ve hata oranı arasındaki ilişki Denklem (1)'de gösterildiği gibidir.

$$R(t) = e^{-\int_0^t h(x) dx} \quad (1)$$

Çalışma boyunca hata oranı sabit olarak kabul edilmiş ve λ ile gösterilmiştir. Denklem (1)'i sabit hata oranını yerine koyacak şekilde düzenlenirse, Denklem (2) elde edilir.

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (2)$$

Hata oranı, sıcaklık ve yük miktarı gibi parametrelere bağlı olarak değişmektedir. Hata oranının değişimi, Denklem (1) ve (2)'den anlaşılacağı üzere, güvenilirliği değiştirecektir. Çalışma boyunca hata oranının değişimini etkileyen ana faktör olarak robotların üzerlerindeki yük miktarları esas alınmıştır. Hata oranı ve yük miktarı arasındaki ilişki Denklem (3)'te verildiği gibidir.

$$\lambda = \lambda_0 \left(\frac{P}{P_0} \right)^3 \quad (3)$$

λ_0 yükün olmadığı durumda ortaya çıkan hata oranını gösterirken, λ robotun üzerinde yükün olduğu durumda ortaya çıkan hata oranını gösterir. P robotun üzerine konulan yükü ile robotun yük taşıma kapasitesinin toplamını belirtirken, P_0 robotun yük taşıma kapasitesini belirtir.

Tablo 1: Robotlara Ait Bilgiler

Bilgiler	Robotlar	
	Robot 1	Robot 2
Hız	1 metre/saniye	1 metre/saniye
Yük Kapasitesi	100 kilogram	100 kilogram
Hata Oranı	5e-007 hata/saat	5e-003 hata/saat
Güvenilirlik	0.99	0.85

Tablo 2: Bulanık Çıkarım Sistemi

Değişkenler		Üyelik Fonksiyonları
Girdiler	Yük Miktarı -Hafif -Orta -Ağır	
	Çıkışa Uzaklık -Yakın -Normal -Uzak	
Çıktılar	Robot Seçimi -Robot1 -Robot2	
	Tahmini Hata Oranı Değişimi -ÇokAz -Az -Normal -Fazla -ÇokFazla	

Çalışmada güvenilirliği etkileyen kavramlar kullanılarak, bir bulanık çıkarım sistemi tasarımı yapılmış ve ürünlerin robotlara paylaştırılmasında tasarlanan sistem kullanılmıştır. Bulanık çıkarım sistemi, girdileri istenilen çıktılara eşleştirmek için, bulanık bilgi tabanı ve bulanık kuralları kullanan bir sistemdir. Bulanık çıkarım sistemi sırasıyla, bulanıklaştırma, çıkarsama ve kesinleştirme adımlarından oluşur. Kullanılan bulanık çıkarım sistemi Tablo 2'de verilmiştir.

III. ÇALIŞMA ORTAMI

Görev paylaşımı uygulaması için tasarlanan platform, 2 mobil robot ile rastgele dağıtılmış ve farklı yük miktarlarına sahip 10 adet ürünü kapsayan, 50×50 m² ortamdan oluşmaktadır. Robotların başlangıç hata oranları birbirinden farklı, yük taşıma kapasiteleri ve hızları aynı kabul edilmiştir. Ayrıca, Robot 1, Robot 2'den daha güvenilir olarak kabul edilmiştir. Robotlara ait bilgiler Tablo 1'de verilmiştir.

Tasarlanan sistemde, robotlar mevcut 10 ürün aralarında paylaşarak çıkış noktasına götürmektedir. Ürünlerin konumları ve yük miktarları Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3: Ürünler Ait Bilgiler

Ürün Bilgisi	Ürün Numarası									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X(metre)	00	00	05	20	20	30	30	45	50	50
Y(metre)	45	05	25	10	40	40	10	25	45	05
Yük(kg)	07	12	08	03	16	37	18	22	30	23

IV. GÖREV PAYLAŞIM ANALİZİ VE SİSTEMİN GÜVENİLİRLİĞİ

Çoklu robotik sistemlerde, çoğunlukla yakınlık tabanlı(klasik) görev paylaşımı yapılmasına rağmen, bu durum çoğu zaman güvenilir sonuçlar ortaya çıkarmamaktadır. Önerilen sistemde robotik sistemler için görev paylaşımı bulanık mantık yardımıyla, robotların güvenilirliğini etkileyen faktörler kullanılarak yapılmış ve sonuçlar yakınlık tabanlı görev paylaşımı ile karşılaştırılmıştır. Her iki durumda da görev paylaşımının ardından, rota takibi bulanık çıkarım sisteminden çıkan sonuca göre tahmini olarak yapılmıştır.

A. Yakınlık Tabanlı Görev Paylaşımı ve Sistemin Güvenilirliği

Yakınlık tabanlı görev paylaşımı, robotların kendisine yakın olan ürünleri toplamasına dayanır. Robotların yük miktarı ve çıkış noktasına olan uzaklıkları göz önünde bulundurulmaz. Görev paylaşımı yapıldıktan sonra, robotların güvenilirlikleri, Denklem (2) ve (3) yardımıyla, her bir robot için gittiği her düğümde güncellenir ve görev sonu güvenilirlik değerleri bulunur. Robotların görev sonu güvenilirlikleri yardımıyla, robotik sistemin güvenilirliği Denklem (4)'te verildiği gibi hesaplanır.

$$R_{toplaml} = R_{robot1} \times R_{robot2} \quad (4)$$

B. Güvenilirlik Tabanlı Görev Paylaşımı ve Sistemin Güvenilirliği

Önerilen sistemde, görev paylaşımı için 2 parametre göz önüne alınmıştır. Bunlardan ilki, düğümlerde bulunan ürünlerin yük miktarları, diğeri de ilgili düğümün çıkış noktasına olan uzaklığıdır. Bu iki giriş kullanılarak, bulanık çıkarım sistemi oluşturulmuş ve robot seçimi ile tahmini hata oranı değişimi çıkış olarak elde edilmiştir.

Bulanık çıkarım sisteminin kuralları basit bir şekilde tanımlanmıştır. Ürünleri, yük miktarı hafifse, uzaklığa bakılmaksızın düşük güvenilirliğe sahip robot, yük miktarı ağırsa, uzaklığa bakılmaksızın, yüksek güvenilirliğe sahip robot almıştır. Orta ağırlıkta bir yük varsa, ilgili yük çıkışa yakınsa, düşük güvenilirliğe sahip robot, yakın değilse yüksek güvenilirliğe sahip robot ürünü almıştır. Çıkarım sisteminde elde ettiğimiz diğer çıktı ise, yüklerin miktarı ile çıkış noktasına olan uzaklıklarının, hata oranını tahmini olarak ne kadar değiştirdiğidir. Düşük yükte bir ürün uzak değilse, hata oranı çok az değişecek, uzaksa, hata oranı az değişecektir. Normal ağırlıkta bir yük, eğer çıkışa yakınsa, hata oranı az değişecek, yakın değilse, normal şekilde değişecektir. Eğer yük miktarı ağır ve düğüm noktası çıkışa

yakınsa, hata oranı normal değişecek, yük miktarı ağır, çıkışa yakınlık normal ise, hata oranı fazla değişecek, yük miktarı ağır, çıkışa olan uzaklık fazla ise, hata oranı çok fazla değişecektir. Güvenilirlik, Denklem (2)'de belirtildiği gibi zamana bağlı bir fonksiyondur. Bu yüzden, çıkışa olan mesafe değiştikçe, robotun görev yapacağı süre de değişeceğinden, güvenilirlik değeri çıkışa olan uzaklığa bağlı olarak değişecektir. Bulanık çıkarım sistemi yardımıyla görev paylaşımının ardından, her robotun güvenilirliği ve sistemin toplam güvenilirliği yakınlık tabanlı görev paylaşımında olduğu şekilde hesaplanmıştır.

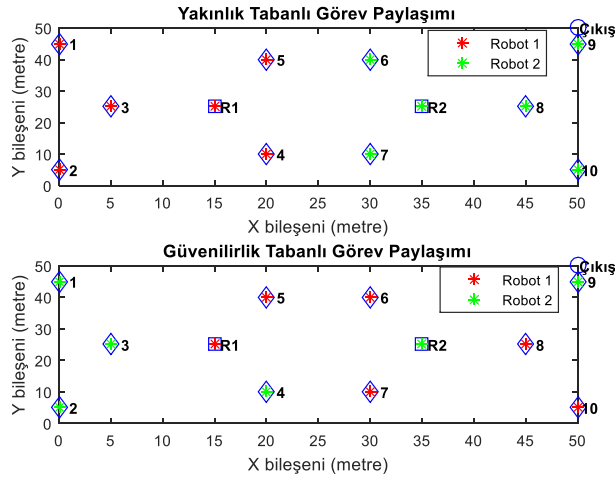
V. TESTLER

Toplamda 3 farklı test yapılmıştır. Tüm testlerde robotların hızı, başlangıç güvenilirlik değerleri, yük taşıma kapasiteleri Tablo 1'de verildiği gibi alınmıştır. Bilinmesi gereken, tüm testlerde, robotların yük taşıdıkça ve yol kat ettikçe hata oranlarının değiştiğidir. Dolayısıyla bu durum, robotların güvenilirliğini değiştirmektedir. Testlerde robotların başlangıç konumları ve/veya ürünlerin taşınacağı çıkış noktasının konumu değişmiştir. Her teste robotların aldığı ürünler, robotların görev sonu güvenilirlik değerleri ve sistemin toplam güvenilirlikleri hem güvenilirlik tabanlı görev paylaşımı için hem de yakınlık tabanlı görev paylaşımı için bulunmuş, çıkan sonuçlar karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Verilen tüm şekiller için, yuvarlak nokta çıkışın, kare noktalar robotların, elmas noktalar ürünlerin konumunu gösterir. İçi kırmızı ile dolu noktalardaki ürünleri Robot 1, yeşil ile dolu noktadaki ürünleri Robot 2 almaktadır.

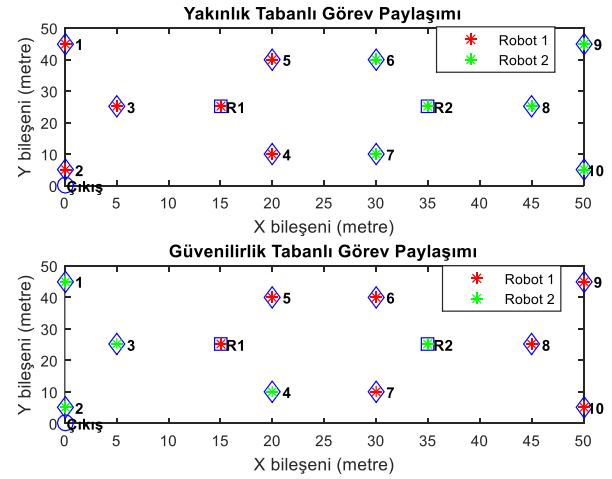
Örnek 1'de robotların başlangıç konumları Robot 1 için (15,25), Robot 2 için (35,25) noktalarıdır. Ürünlerin taşınacağı çıkış noktası (50,50) noktasıdır. Bu durumda yakınlık tabanlı ve güvenilirlik tabanlı görev paylaşımı ve robotların son güvenilirlik değerleri ile sistemin güvenilirlik değerleri Tablo 4'te gösterilmiştir. Örnek 1 için, yakınlık tabanlı ve güvenilirlik tabanlı görev paylaşımının sonuçları Şekil 1'de verilmiştir.

Tablo 4: Örnek 1 İçin Elde Edilen Sonuçlar

Görev Paylaşımı Biçimi	Özellikler	Robotlar	
		Robot 1	Robot 2
Yakınlık Tabanlı	Alınan Ürünler	1,2,3,4,5	6,7,8,9,10
	Robotun Güvenilirliği	0.98999988	0.80182742
	Sistemin Güvenilirliği	0.79380906	
Güvenilirlik Tabanlı	Alınan Ürünler	5,6,7,8,10	1,2,3,4,9
	Robotun Güvenilirliği	0.98999693	0.84931187
	Sistemin Güvenilirliği	0.84081615	



Şekil 1: Örnek 1 için Görev Paylaşım Sonuçları



Şekil 2: Örnek 2 için Görev Paylaşım Sonuçları

Örnek 2’de robotların başlangıç konumları sabit tutulmuş, çıkış noktasının konumu (0,0) olarak değiştirilmiştir. Bu durumda yakınlık tabanlı ve güvenilirlik tabanlı görev paylaşımı ve robotların son güvenilirlik değerleri ile sistemin güvenilirlik değerleri Tablo 5’te gösterilmiştir. Örnek 2 için yakınlık tabanlı ve güvenilirlik tabanlı görev paylaşımının sonuçları Şekil 2’de verilmiştir.

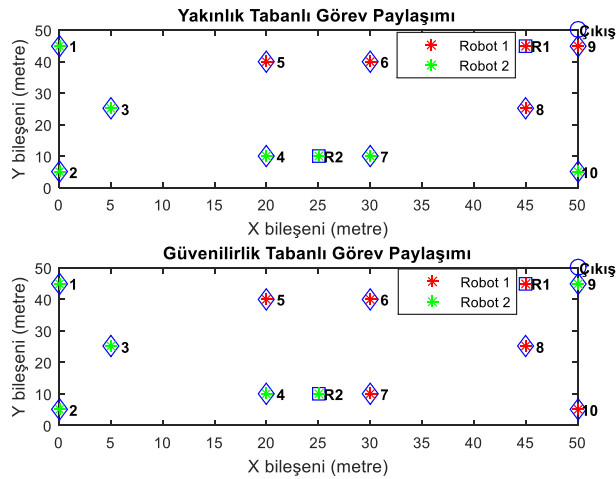
Tablo 5: Örnek 2 için Elde Edilen Sonuçlar

Görev Paylaşımı Biçimi	Özellikler	Robotlar	
		Robot 1	Robot 2
Yakınlık Tabanlı	Alınan Ürünler	1,2,3,4,5	6,7,8,9,10
	Robotun Güvenilirliği	0.98999985	0.75094526
	Sistemin Güvenilirliği	0.74343569	
Güvenilirlik Tabanlı	Alınan Ürünler	5,6,7,8,9,10	1,2,3,4
	Robotun Güvenilirliği	0.98991852	0.84945678
	Sistemin Güvenilirliği	0.84089300	

Örnek 3’te robotların başlangıç konumları Robot 1 için (45,45), Robot 2 için (25,10) noktalarıdır. Ürünlerin taşınacağı çıkış noktası (50,50) noktasıdır. Bu durumda yakınlık tabanlı ve güvenilirlik tabanlı görev paylaşımı ve robotların son güvenilirlik değerleri ile sistemin güvenilirlik değerleri Tablo 6’da gösterilmiştir. Örnek 3 için yakınlık tabanlı ve güvenilirlik tabanlı görev paylaşımının sonuçları Şekil 3’te verilmiştir.

Tablo 6: Örnek 3 için Elde Edilen Veriler

Görev Paylaşımı Biçimi	Özellikler	Robotlar	
		Robot 1	Robot 2
Yakınlık Tabanlı	Alınan Ürünler	5,6,8,9	1,2,3,4,7,10
	Robotun Güvenilirliği	0.98999941	0.84474111
	Sistemin Güvenilirliği	0.83629320	
Güvenilirlik Tabanlı	Alınan Ürünler	5,6,7,8,10	1,2,3,4,9
	Robotun Güvenilirliği	0.98999693	0.84933099
	Sistemin Güvenilirliği	0.84083508	



Şekil 3: Örnek 3 İçin Görev Paylaşım Sonuçları

VI. TEST SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Sonuç olarak, test sonuçları incelendiğinde, robotların konumu değişmediğinde, yakınlık tabanlı görev paylaşımı diğer parametrelere bağlı olmadığı için değişmemektedir. Örnek 1 ve Örnek 2 karşılaştırıldığında, çıkış noktasının konumunun değişmesi, robotların güvenilirlik değerlerini her iki görev paylaşımı için de değiştirmektedir. Bunun sebebi, robotların ürünleri çıkış noktasına taşımasından kaynaklı meydana gelen hata oranı değişimidir. Aynı sebepten ötürü, Örnek 1 ve Örnek 2 karşılaştırıldığında, yakınlık tabanlı görev paylaşımı sonuçları değişmemekte, güvenilirlik tabanlı görev paylaşımı sonuçları değişmektedir. Örnek 1 ve Örnek 3 karşılaştırıldığında, robotların konumlarının değiştirilmesi, yakınlık tabanlı görev paylaşımının değişmesine, dolayısıyla güvenilirlik değerlerinin farklı çıkmasına neden olmuştur. Aynı şekilde, güvenilirlik tabanlı görev paylaşımı ve bunun sonucunda

sistemin güvenilirliği değişmiştir. Özetle, ürünlerin çıkış noktasına olan uzaklıkları ve yük miktarları hata oranını değiştirdiğinden, robotik sistemin güvenilirliğini de değiştirecektir. Önerilen sistemin en önemli sonucu ise, her örnek için güvenilirlik tabanlı görev paylaşımı sonucu sistemin toplam güvenilirliğinin, yakınlık tabanlı görev paylaşımı sonucu elde edilen sistem güvenilirliğinden fazla olduğudur. Daha güvenilir robotik sistemler için, güvenilirlik tabanlı görev paylaşımı yapılması daha uygundur.

YAZAR KATKILARI

Bu çalışmada, birinci ve ikinci yazar güvenilirlik modelinin ve bulanık mantık çıkarım sisteminin oluşturulması ile test sonuçlarının analizi konularında görev almıştır. Üçüncü yazar bulanık mantık çıkarım sistemi oluşturulması üzerine ve dördüncü yazar ise robotik konusunda danışmanlık yapmışlardır.

KAYNAKÇA

- [1] Yayan U., Ozupek D., Tas M.O., Yazici A., "Mobil robotların güvenilirlik tabanlı görev başarımlı analizi", in Proc. of the IEEE Signal Processing and Communication Application Conference, 2016, p. 1297-1300.
- [2] Sharmar, S.P., Kumar, D., Kumar, A., "Reliability analysis of complex multi-robotic system using GA and fuzzy methodology", Applied Soft Computing, 2012, 405-415
- [3] Stancliff, S.B., Dolan, J.M., Trebi-Ollennu, A., "Mission Reliability Estimation of Repairable Robot Teams", International Journal of Advanced Robotic Systems, 2005
- [4] Stancliff, S.B., Dolan, J.M., Trebi-Ollennu, A., "Planning to Fail - Reliability Needs to Be Considered *a Priori* in Multirobot Task Allocation", IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 2009
- [5] Parker, E.L., "Handbook-Collective-Robotics", 2011, Chapter Six
- [6] S.Stancliff, J.M.Dolan, A.Trebi-Ollennu, "Towards a Predictive Model of Robot Reliability" in Carnegie Mellon University, 2005