

Bağlamın Hiyerarşik Doğası

Fethiye Irmak Doğan, Sinan Kalkan

Bilgisayar Mühendisliği Bölümü

Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Ankara, Türkiye

Email: {irmak.dogan,skalkan}@metu.edu.tr

Özetçe —Bağlam, insan bilişi için oldukça elzemdir ve du-
ruş, davranış, konuşma biçimi gibi gündelik insan hayatı için
önemli pek çok sürece etki etmektedir. Yakın zamanda hay-
atımızda yer edinmesini beklediğimiz robotların da işlevlerini
yerine doğru ve verimli bir biçimde getirebilmesi için, bağlamı
algılama ve kullanma yeteneğine sahip olması beklenmektedir.
Ancak bağlam, yapay veya doğal biliş için ne kadar elzem
olsa da, bağlamın yapısı yeterince çalışılmış ve çözümlenebilmiş
değildir. Bu çalışmada, bağlamın çözümlenememiş öğelerinden
bir tanesine, bağlamın yapısının hiyerarşik olup olmadığına
odaklanılmaktadır. Yaptığımız irdelemeye göre, bağlama ait
muhtelif sosyal, uzamsal ve zamansal özellikler ve olgular,
bağlamın hiyerarşik bir yapıya sahip olduğunu önermektedir. Bu
konudaki sinirbilim, psikoloji bulguları ve bilişimsel modelleme
çalışmaları irdelenmiş, bağlamı hiyerarşik yapan özelliklere yer
verilmiş, bağlamı modellerken dikkat edilmesi gereken noktalara
değinilmiş ve elde edilen vargılar sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler—Bağlam, Bağlam Hiyerarşisi, Bilişsel
Robotbilim

I. GİRİŞ

Bağlam, insan bilişi için çok önemlidir ve insanların algı,
tanıma, mantık yürütme, problem çözüme gibi bilişsel süreç-
lerini ve buna ek olarak, davranışlarını, konuşma biçimlerini
vb. etkilemektedir [1], [2]. Bağlamın etkilerini gündelik insan
hayatındaki en karmaşık olaydan en basit olaya kadar gö-
zlemlemek mümkündür. Bizim gibi benzer bilişsel yeteneklere
sahip olmasını beklediğimiz robotlar için de bağlamı algılaya-
bilmek, öğrenebilmek ve kullanabilmek muhakkak önemlidir.
Bağlam, insan bilişi ve yapay biliş için bu kadar elzem olsa da,
bağlamın yapısı henüz çözümlenebilmiş değildir ve bağlamın
yapısına dair elde edilecek sonuçlar birçok alandaki bilimsel
çalışmalarda ön açıcı olacaktır.

Bağlamın yapısıyla ilgili vargılar elde edebilmek için,
bağlamın özelliklerini incelemek gereklidir. Zimmermann'ın
bağlamı tanımladığı makalesinde, bağlamın süregelen tanımlarında sosyal, uzamsal ve zamansal özelliklerine yer verildiği görülür [3]. Sosyal özellikler ortamın bir arkadaşı ya da aile ortamı olması gibi özellikleri içerirken, uzamsal özellikler bağlamın kapalı ya da açık bir mekanla ilişkili olmasını ve zamansal özellikler de bağlamın sabah, öğle ya da akşam bağlamına ait olmasını içermektedir.

Sosyal, uzamsal ve zamansal özellikleri detaylı in-
celediğimizde, bu özelliklerden dolayı bağlamın birbir-
lerini içeren ya da birbirleriyle ilintili olduğu, hatta bağlamın
hiyerarşik bir yapıda olması gerektiği sonucuna varılabilir.
Örneğin “kahvaltı hazırlama” bağlamı, sosyal anlamda “aile”
bağlamını, uzamsal anlamda “mutfak” bağlamını ve zamansal

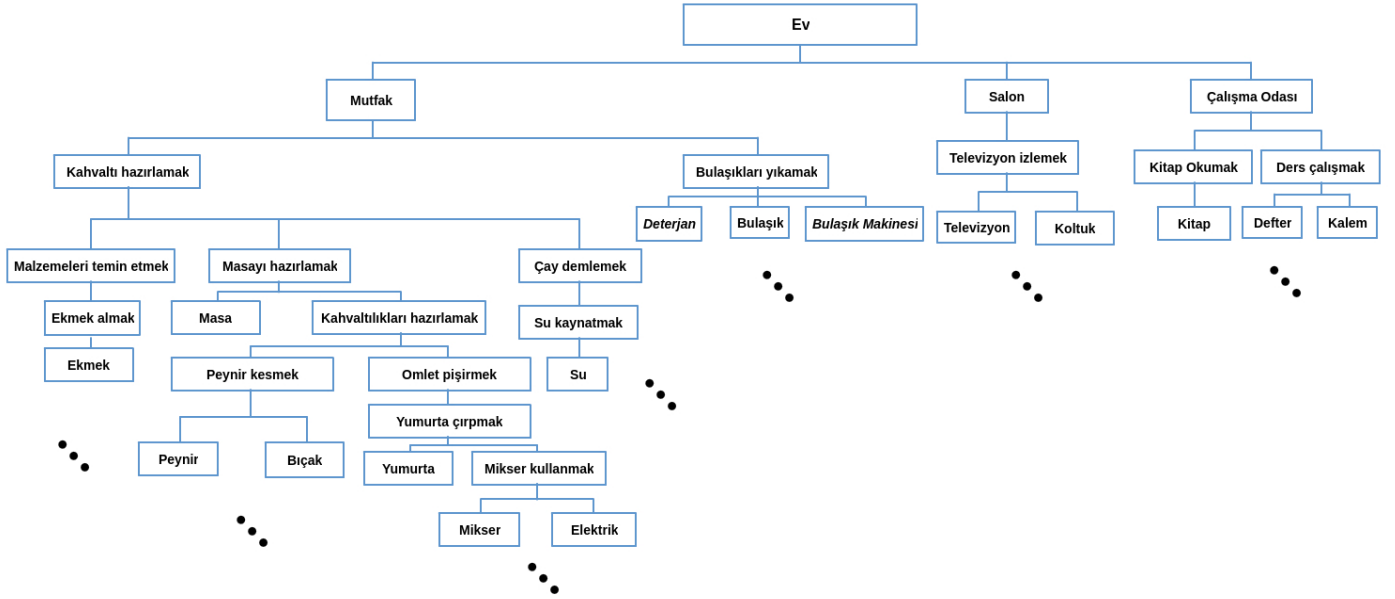
anlamda “sabah” bağlamını içerebilir ve bağlamların birbirini
içermesi nedeniyle hiyerarşik bir yapı oluşturur – ev bağlamına
ait örnek bir hiyerarşi için bkz. Şekil 1.

Bağlamın yapay zeka alanında kullanımı üzerine öncüler-
den bir tanesi, McCarthy'dir. McCarthy, bağlamı formalize
etmeye çalıştığı makalesinde bağlama ait aşağıdaki önemli
özelliklere yer vermiştir [4]: (i) Bağlamlar, formal nesnelere
(ii) Bağlamlar, tam olarak tanımlanabilirler. (iii) Bağlamlar ve
bağlamsal fonksiyonlar arasında kullanışlı bağlantılar vardır
ve bir bağlamdan çeşitli değişikliklerle (yeri, zamanı ya da
durumu farklılaştırmak gibi) yeni bir bağlam elde edilebilir.

McCarthy'nin bağlam yapısından yola çıkarak, bağlam-
ların dinamik olarak değişebildiği, bağlamlara diğer bağlamlar
tarafından ulaşılabilirdiği, bir bağlamın öteki bağlamın sınırlarının içine girebildiği, bağlamın bu karmaşık yapısıyla baş
etmek için ilişkisel yapılar kullanmak gerektiği, ve bu yapıların
bağlamın çeşitli ilişkilerini ve bağlamın dinamik yönünü
desteklemesi gerektiği söylenebilir [5]. 20 yıldan daha uzun
bir süre önce McCarthy tarafından yapılmış olan böylesi bir
tanım da, aslında, bize bağlamlar arası ilişkilerin varlığını ve
bağlamların birbirlerini içerdiğini, yani bağlamın hiyerarşik bir
yapısının olduğunu vurgulamaktadır.

Barsalou, bağlam üzerine çalışmış diğer önemli bir isimdir
ve Yeh ile birlikte yaptığı çalışmasında bağlamın insan bil-
işine olan etkisine değinmiştir [1]. Bağlamın biliş üzerine
etkisini olaysal bellek, nesne algısı ve dili kavrama gibi
bilişsel süreçler üzerinden örnekleyerek açıklamıştır. Ayrıca
kavramsal süreçlerin durumların tane büyüklüğünden (grain
size) etkilendiğini söylemiş ve bir durumun uzun bir zamanda
geniş bir alan kaplamasının da kısa bir zamanda ufak bir alan
kaplamasının da mümkün olduğunu belirtmiştir. Durumların
hiyerarşik olarak birleşmiş gruplarının bağlamı oluşturduğunu
söylemiş ve bunun bağlama hiyerarşik bir yapı kattığına işaret
etmiştir.

Bu bildiri, bağlamın hiyerarşik bir yapıya sahip olduğunu
belirtir sinirbilimden, psikolojiden ve bilişimsel modellemel-
erden elde edilen bulguları ve önermeleri incelemekte, ve
bu bilgiler doğrultusunda, robotlarda bağlamı modellemeyi
hedefleyen çalışmalar için bağlamın hiyerarşik olması gerektiğini önermektedir. Bağlamın hiyerarşik yapıda olması önemli olsa da, bu bilişsel bilimlerde hiç açık bir şekilde irdelenmemiştir; bu açıdan, bu çalışma önemli bir katkı sağlamaktadır. Ayrıca, bilgisayarlı görü çalışmalarında bağlam hiyerarşik bir biçimde modellenmeye başlamış olsa da, bu çalışmalar pek çok eksik barındırmaktadır. Bu kısıtlamalara rağmen bağlam hiyerarşisinin sağladığı katkılardan esinlenerek, robotbilim çalışmalarında bağlam hesaba katılacağı zaman, hiyerarşik bir yapıda modellenmesi gerektiği önerilmektedir. Bağlamın



Şekil 1: Varsayımsal bir ev bağlamı hiyerarşisi.
(Yer sınırı nedeniyle hiyerarşinin belli kısımları gösterilmiştir.)

hiyerarşik modellenmemesi, bütün özelliklerinin ifade edilememesine, alınan sonuçların yetersiz kalmasına neden olabilir. **Bu çalışma özgün bildiri olmayıp, çalışmanın İngilizce hali CONTEXT-17 konferansına değerlendirilmek üzere gönderilmiştir.**

II. BAĞLAMIN HİYERARŞİK YAPIDA OLDUĞUNU GÖSTERİR BULGULAR

Bu bölüm altında, bağlamın hiyerarşik bir yapıda olduğunu destekleyen veya öneren farklı disiplinlerden elde edilmiş bulgular sunulmaktadır.

A. Sinirbilimden Bulgular

Hipokampus, beyinin hafızada önemli görevleri olan kısmıdır ve bağlamın sinirsel gösterimini yarattığı bilinmektedir [6]. Ruddy, makalesinde bir çok araştırmacı tarafından hipokampal formasyonun davranışlardaki bağlam etkisinde çok büyük bir rol oynadığının kabul edildiğini yazmıştır [7]. Bununla ilintili olarak, Lila Davachi ise hipokampal sistemin kademelerinin daha sonra oluşan ilişkisel hafıza ile bağlantılı işlemleri desteklediğini belirtmiştir [8]. Ayrıca, burnu saran (perirhinal) ve arka (posterior) parahipokampal mekanizmanın daha özel alanlı öğelere ve uzamsal bağlam kodlarına katkı sunduğunu eklemiştir.

Bağlam için önemli bir role sahip olan hipokampusün formasyonunun, hiyerarşik bir yapıya sahip olduğu düşünülmektedir. Örneğin, McKenzie vd., son buluşların hipokampal sinir sisteminin alakalı hafıza kısımlarını bağlayan hiyerarşik bir yapıya sahip olduğunu gösterdiğini önermiştir [9].

Hipokampusün bağlam oluşumunda temel görevleri üstleniyor olması, bağlamsal kodlamalara sunduğu katkı ve

kendi içerisindeki kademeli hiyerarşik çalışma yapısı bağlamın da hiyerarşik bir yapıya sahip olduğunu önermektedir.

B. Psikolojiden Bulgular

Malesef psikoloji biliminde bağlamı hiyerarşik olarak modellemiş çalışmalara rastlamak mümkün olmamıştır. Psikoloji biliminin pek çok alanda hiyerarşik yapılar kullanırken henüz bağlamın modellenmesinde bu hiyerarşik yapılara yer vermemiş olması mevcut çalışmaların önemli bir eksikliğidir. Bağlamın hiyerarşik yapısı üzerine direkt olmasa da, dolaylı destek, Saaty'nin karar verme süreçlerinin hiyerarşik yapıda olduğunu gösterdiği çalışmasından gelmektedir [10]. Hiyerarşik bir yapının birden fazla faktöre bağlı kararların alınmasında iyi bir yaklaşım olması, birden fazla etmen içeren bağlamın modellenmesinde de iyi sonuçlara ulaşabileceğini desteklemektedir.

C. Bilişimsel Modelleme Çalışmaları

Bağlamı hiyerarşik bir yapıya kavuşturmaya çalışmış pek çok teşebbüs bulunmaktadır. Örneğin, Sun vd., zaman-mekansal (spatio-temporal) bağlamı videolarda hareket tanıma problemi için hiyerarşik bir şekilde modellemiştir ve 3 seviyeli, kendi tanımladıkları ve tasarladıkları bir bağlam yapısı kullanmıştır [11]. Bu seviyeler, nokta seviyesinde (point-level) bağlam, yörünge içi (intra-trajectory) bağlam (trajectory transition descriptor) ve yörüngeler arası (inter-trajectory) bağlam (trajectory proximity descriptor) şeklindedir. Bir başka çalışmada Wang ve Ji, güvenlik kameralarında olay tanıma için hiyerarşik bir bağlam yapısı kurmuştur [12], [13]. O da 3 seviyeli bir hiyerarşi benimsemiştir ve daha önceki çalışmaların genelde bağlamı tek bir seviyeden çıkarmaya çalıştığını, aynı zamanlı farklı seviyelerden farklı bağlamlar çıkarmaya çalışan çok çalışma olmadığını vurgulamıştır. Çalışmasında öznelik (feature) seviyesindeki bağlam, anlamsal (semantic) seviyedeki

bağlam ve önsel (prior) seviyedeki bağlamı eş zamanlı olarak çıkarıp birleştirmeyi ve güvenlik kameralarındaki olayları doğru bir şekilde tespit etmeyi amaçladıklarını söylemiştir. Bu çalışmalarda hiyerarşi, Şekil 1'de gösterildiği gibi anlamsal bir hiyerarşi değil, tasarlanmış, statik bir yapıda hiyerarşidir. Ayrıca, sadece belirli modalitelerde bağlam düşünülmüştür ve bu nedenle, bu çalışmaların kapsamı dar kalmıştır.

İlgi çekici bir diğer çalışmada ise, Choi vd., içerisinde çok fazla nesne kategorisi içeren bir veri kümesinde hiyerarşik bir bağlam çıkarmaya çalışmış, nesnelere birlikte bulunma ve uzamsal ilişkilerine göre grafiksel bir ağaç yapısı modellenmiştir [14]. Bu ağaç yapısıyla nesne kategorileri arasındaki bağımlılıklar ortaya çıkarılmıştır. Ayrıca, öğrenilen bu ağaç yapısı nesnelere ve görüntüler arasında kendi doğalarında bulunan hiyerarşiyi ortaya koymuştur. Bu model nesnelere arası bağlam ilişkisini hiyerarşik bir şekilde ortaya koymuş, nesne ve sahne tanıma problemlerinin çözümünde önemli ilerlemeler yaratmıştır. Bu çalışmada nesnelere arasında anlamsal olarak modellenmiş bir hiyerarşi yaratılmış olsa da, sadece nesnelere arası bağlamsal ilişkilere yer verilmiş ve genel bir bağlam hiyerarşisi ortaya konmamıştır. Bu sebeple genel anlamsal bir bağlam hiyerarşisi modellenememiştir. Ayrıca nesnelere birlikte bulunma ve uzamsal özelliklerinin ön model olarak kullanılması bağlamın dinamik olması özelliğiyle tam olarak örtüşmemektedir.

Benzer bir çalışma Marszalek vd. tarafından yapılmıştır [15]. Bu çalışmada anlamsal hiyerarşik bir sınıflandırıcı oluşturulmuş ve bu sınıflandırıcı nesne tanıma problemlerinde kullanılmıştır. Bu model sınıflar arası benzerlik ve ilişkileri modellemeyi ve nesne sınıfları içindeki karmaşıklığı azaltmayı amaçlamıştır. Fakat bu çalışmada anlamsal hiyerarşik sınıflandırıcılardan bağlama gidilecek bütün özellikler düşünülmemiş, oluşturulan hiyerarşik bağlam hiyerarşisine genişletilmeyip, nesne tanımlanmasındaki anlamsal hiyerarşi ile sınırlı kalmıştır.

Başka bir çalışmada ise Li vd., cinsiyet, giyim şekli gibi insan özelliklerinin tanınmasına odaklanmış ve bunun için derin hiyerarşik bir bağlam yapısı kullanmıştır [16]. Bu derin hiyerarşik bağlam, insan bağlamı ve arka plandaki sahne bağlamını içermektedir. Bu bağlamı oluşturmak için Katmanlı Sinir Ağları (Convolutional Neural Networks) modeli kullanılmıştır. Bir başka deyişle derin katmanlı sinir ağları tarafından sadece insan vücudu ve özelliklerine özgül skorlar öğrenilmemiş, aynı zamanda derin hiyerarşik bağlamı oluşturan skor fonksiyonları da öğrenilmiştir. Özellikle insan ve sahne modellerinin skorlamasındaki işbirliği, insana ve sahneye bağlı bağlamın oluşturulmasında görev yapmıştır. İnsan ve sahne bağlamlarının birleşimi hiyerarşik bir bağlam yapısı oluşturmuştur. Bu çalışmada da genel bir bağlam yapısı ortaya konamamış, insan özelliklerine odaklanmış bağlamsal ilişkilere yer verilmiştir. Bu sebeple bu çalışma da genel bir hiyerarşik bağlam yapısı oluşturmada yetersiz kalmıştır. Ayrıca bu çalışma da hiyerarşiyi anlamsal olarak değil insan merkezli bağlam ve sahne merkezli bağlamın birleşimi olarak gösterip Şekil 1'deki anlamsal hiyerarşinin modellenmesinde eksik kalmıştır.

Bağlamın robotlarda kullanılmasının, bilişsel çalışmalarda özellikle algı ve planlamada performansı artırması yeni bir yaklaşım değildir ve bu düşünceyle robotlarda da bağlamı modelleyen ve kullanan çalışmalar yapılmıştır [17], [18], [19].

Ancak bu çalışmalar bağlamı genellikle hiyerarşik modellememiştir. Robotlarda hiyerarşik yapılar kullanarak öğrenme üzerine odaklanmış çalışmalarda (örn. [20], [21]) mekansal veya uzamsal hiyerarşik gösterimler önerilmiştir, ancak genel bir bağlam hiyerarşisi ortaya koyulmamıştır.

III. VARGI: BAĞLAM HİYERARŞİKTİR

Bağlamın hiyerarşik yapısına dair sinirbilimden ve psikolojiden bulgulara bir önceki kısımda yer verilmiş, ayrıca bu konudaki bilişimsel modellerle çalışmaları gösterilmiştir. Bu çalışmalar, bağlamı tam anlamıyla hiyerarşik modellemekte her ne kadar yetersiz kalmış olsalar da bağlamın hiyerarşik bir yapıya sahip olduğuna dair önemli vargılar içermektedir.

Doğa, toplum, ve pek çok olgu kendi içinde seviyeli yani hiyerarşik bir yapıya sahiptir. Beynin hipokampal sisteminin hiyerarşik bir çalışma yapısına sahip oluşu [9] insan vücudunun hiyerarşik bir çalışma yapısı izlediğine; karar vermenin hiyerarşik bir yapıyla ifadesi [10] psikolojinin çalışma alanındaki konuların hiyerarşik doğaya sahip olduğuna sadece birer örnektir. Hiyerarşi, pek çok alanda çalışılmaktadır. Örneğin, Lane, hiyerarşi üzerine yaptığı çalışmasında toplum, kültür, ekonomi gibi unsurları birleştiren insana ait toplumsal hiyerarşilerin, fiziko-kimyasal (temel parçasık, çekirdek, atom, molekül arasındaki hiyerarşi gibi) ve biyolojik (organel, hücre, organ, çokhücreliler, popülasyon, tür, ekosistem arasındaki hiyerarşi gibi) hiyerarşilerden daha muğlak bir yapı içerdiğini söylemiştir [22]. Hiyerarşi bu denli geniş temas alanlarına sahipken, bu alanlardaki sosyal, uzamsal ve zamansal ilişkilere tekabül eden bağlamın da hiyerarşik bir yapı göstermesi olağan bir durumdur.

Bağlamın uzamsal, zamansal ve sosyal özellikler göstermesi [3], [4] ve bu özelliklerin hiyerarşik birleşimlerinin bağlamı oluşturması bağlamı kaçınılmaz olarak hiyerarşik yapmıştır.

Bağlam hiyerarşisinin videolarda hareket tanıma, nesnelere kategorilere ayırma ve insan özelliklerini çıkartma gibi pek çok farklı alanda kullanılıyor olduğu önceki kısımda gösterilmiştir. Bağlamın hiyerarşik modellenmesinden farklı alanlarda başarılı sonuçlar elde edebiliyor olması bağlamın hiyerarşik bir yapıya sahip olduğunu desteklemektedir. Bağlam süregelen çalışmalarda genellikle tek bir seviyeden çıkarılmaya çalışılmıştır ve hiyerarşik modellenmemiştir. Bağlamı hiyerarşik modelleyen çalışmalar, bağlam çalışmalarının tek bir seviye içermesini eleştirmekte ve bağlamı birden fazla seviyeden çıkarıp birleştirmenin daha iyi bir yaklaşım olduğu savunmaktadır [12]. Bu savunu bağlamı hiyerarşik modellemenin daha doğru bir yaklaşım olduğuna işaret etmektedir.

IV. ROBOTLARDA BAĞLAMIN HİYERARŞİK MODELLENMESİNE DOĞRU

Bağlamın hiyerarşik olarak modellenmesi için çözülmesi gereken hususlar aşağıda listelenmiştir:

Gösterim: McCarthy bağlamları formal, tam olarak tanımlanabilen nesnelere olarak nitelendirmiştir [4]. Bundan hareketle, bağlam modellemesinde karşılaşılabilecek ilk sorun, bağlamın doğru bir şekilde gösterilmesidir. Mevcut çalışmalar bağlamı formal bir şekilde gösterip tüm özelliklerini yansıtacak bir tanım yapmakta yetersiz kalmışlardır.

Öğrenme: Yine McCarthy'nin tanımından hareketle bağlamlar birbirleriyle ilişkisel yapılar içermektedir [4] ve bağlamı hiyerarşik modellemek için bağlamlar arası bu ilişkisel yapıların öğrenilmesi bağlamın kapsayıcı bir gösteriminin yapılmasının ardından baş edilmesi gereken başka bir problemdir. Bu konuda varolan çalışmalarda kullanılan yapılar incelendiğinde, derin öğrenme içerikli yapıların doğaları gereği buldukları çok katmanlı yapı, hiyerarşik bağlamı daha iyi modelleyecek gibi görünmektedir. Aynı hiyerarşik bağlam yapısını modelleyen çalışmalardan derin modelleme kullanan çalışma daha başarılı sonuçlar vermiştir [13]. Ayrıca kurulan yapının öğrenilmesinde bağlamı öğrenmesi planlanan sistem de önemlidir. Örneğin hiyerarşik bağlam yapısını robotların öğreneceği düşünülürse artırılmış öğrenme sisteminin kullanılması, yeni bir örnek geldiğinde öğrenmenin devam etmesi, öğrenilen bilgilerin yeni örneklerle göre ayarlanması ve öğrenme sürecinde yeterince örnek olmadığını kabul etmesi gibi özellikleriyle [23] robotbilimdeki veri yetersizliği sorununa cevap verip hiyerarşik yapının öğrenilmesine uygun olacaktır.

Bağlamın Kullanımı: Oluşturulan hiyerarşik bağlam yapısının kullanımında hiyerarşinin hangi seviyesinin kullanılacağı doğru bir model için önem taşımaktadır. Bir bağlam farklı seviyelerde farklı bağlamlarla ilişkili olabilir ve her bağlamı amaca göre doğru seviyedeki doğru bağlamlarla ilişkilendirmek gereklidir.

V. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada bağlamın hiyerarşik bir yapıya sahip olduğunu düşündüren bulgulara yer verilmiş, bağlamın hiyerarşik özellikleri belirtilmiş ve bağlamın hiyerarşik olarak robotlarda kullanımı yolundaki problemlerden bahsedilmiştir.

Bağlamların modellenmesine ilişkin önceki çalışmalar incelendiğinde çalışmaların genellikle bağlamı tek bir seviyeden çıkaran hiyerarşik olmayan yapılar olduğu gözlemlenebilir. Fakat bağlamın yapısı, sinirbilimsel ve psikolojik bulgular ve mevcut modellerin incelenmesinden elde edilen vargılar göz önünde bulundurulduğunda bağlamın hiyerarşik olarak modellenmesinin daha doğru olacağı söylenebilir.

Bağlamı hiyerarşik olarak incelemiş olan az sayıdaki çalışmada ise bağlamın probleme özel oluşu sorunu vardır. Bu çalışmalar genel bir hiyerarşik bağlam yapısı oluşturmakta eksik kalmışlar, kurulan modeller başka bağlamlar için de genişletilebilir özellikler göstermemektedir.

Bundan sonraki çalışmalarımızda bağlamın hiyerarşik modellemesine doğru kısmında tariflendiği üzere bağlamın olabilecek en kapsayıcı tanımını yapıp, hiyerarşik bir modelini kurmak, derin öğrenmenin kendi içindeki seviyeli yapısından faydalanarak artırılmış bir yapıyla bağlamın tüm seviyelerde ilişkilendiği bağlamları belirlemek gerekli olacaktır. Ayrıca kurulan hiyerarşik bağlam yapısının tüm bağlamlar için kullanılabilir genel bir model olması ve bağlamın dinamik yapısının bu modele yansıtılması gerekecektir. Tariflediğimiz bu hiyerarşik bağlam modelinin robotların bağlamları öğrenmesine uygun bir yapı olacağı düşünülmektedir.

VI. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından desteklenen 215E133 numaralı "Robotlarda Bağlam" projesi kapsamında yapılmıştır.

- [1] W. Yeh and L. W. Barsalou, "The situated nature of concepts," *The American journal of psychology*, pp. 349–384, 2006.
- [2] J. C. Turner, P. J. Oakes, S. A. Haslam, and C. McGarty, "Self and collective: Cognition and social context," *Personality and social psychology bulletin*, vol. 20, pp. 454–454, 1994.
- [3] A. Zimmermann, A. Lorenz, and R. Oppermann, "An operational definition of context," in *International and Interdisciplinary Conference on Modeling and Using Context*. Springer, 2007, pp. 558–571.
- [4] J. McCarthy, "Notes on formalizing context," *International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 555–560, 1993.
- [5] S. Klarman and V. Gutiérrez-Basulto, "Description logics of context," *Journal of Logic and Computation*, 2013.
- [6] D. M. Smith and S. J. Mizumori, "Hippocampal place cells, context, and episodic memory," *Hippocampus*, vol. 16, no. 9, pp. 716–729, 2006.
- [7] J. W. Rudy, "Context representations, context functions, and the parahippocampal-hippocampal system," *Learning & memory*, vol. 16, no. 10, pp. 573–585, 2009.
- [8] L. Davachi, "Item, context and relational episodic encoding in humans," *Current opinion in neurobiology*, vol. 16, no. 6, pp. 693–700, 2006.
- [9] S. McKenzie, A. J. Frank, N. R. Kinsky, B. Porter, P. D. Rivière, and H. Eichenbaum, "Hippocampal representation of related and opposing memories develop within distinct, hierarchically organized neural schemas," *Neuron*, vol. 83, no. 1, pp. 202–215, 2014.
- [10] T. L. Saaty, "How to make a decision: the analytic hierarchy process," *European journal of operational research*, vol. 48, no. 1, pp. 9–26, 1990.
- [11] J. Sun, X. Wu, S. Yan, L.-F. Cheong, T.-S. Chua, and J. Li, "Hierarchical spatio-temporal context modeling for action recognition," in *CVPR*, 2009.
- [12] X. Wang and Q. Ji, "A hierarchical context model for event recognition in surveillance video," in *CVPR*, 2014.
- [13] —, "Video event recognition with deep hierarchical context model," in *CVPR*, 2015.
- [14] M. J. Choi, J. J. Lim, A. Torralba, and A. S. Willsky, "Exploiting hierarchical context on a large database of object categories," in *CVPR*, 2010.
- [15] M. Marszałek and C. Schmid, "Semantic hierarchies for visual object recognition," in *CVPR*, 2007.
- [16] Y. Li, C. Huang, C. C. Loy, and X. Tang, "Human attribute recognition by deep hierarchical contexts," in *ECCV*, 2016.
- [17] H. Celikkanat, G. Orhan, N. Pugeault, F. Guerin, E. Şahin, and S. Kalkan, "Learning context on a humanoid robot using incremental latent dirichlet allocation," *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*, vol. 8, no. 1, pp. 42–59, 2016.
- [18] Y. Jiang, H. Koppula, and A. Saxena, "Modeling 3d environments through hidden human context," *Tech Report*, 2015.
- [19] A. Anand, H. S. Koppula, T. Joachims, and A. Saxena, "Contextually guided semantic labeling and search for three-dimensional point clouds," *The International Journal of Robotics Research*, 2012.
- [20] H. Zender, O. M. Mozos, P. Jensfelt, G.-J. Kruijff, and W. Burgard, "Conceptual spatial representations for indoor mobile robots," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 56, no. 6, pp. 493–502, 2008.
- [21] B. Kuipers, "The spatial semantic hierarchy," *Artificial intelligence*, vol. 119, no. 1, pp. 191–233, 2000.
- [22] D. Lane, "Hierarchy, complexity, society," in *Hierarchy in natural and social sciences*. Springer, 2006, pp. 81–119.
- [23] X. Geng and K. Smith-Miles, *Incremental Learning*. Boston, MA: Springer US, 2009, pp. 731–735.