

Zaman Algısına İlişkin Hesaplamalı Modeller ve Bilişsel Robotbilim Modelleri

Hamit Başgöl
Bilişsel Bilim
Boğaziçi Üniversitesi
İstanbul, Türkiye
hamit.basgol@boun.edu.tr

Emre Uğur
Bilgisayar Mühendisliği
Boğaziçi Üniversitesi
İstanbul, Türkiye
emre.ugur@boun.edu.tr

Özetçe —Canlılar hayatta kalmak için zamansal bilgiyi kullanırlar. Planlama, karar verme ve iletişim kurma gibi yüksek seviye bilişsel faaliyetler için zamansal bilginin verimli bir biçimde kullanılması gerekir. Zaman bilişsel faaliyetler için önem arz etse de, bilişsel robotbilim literatüründe bu konuya çok az değinilmiştir. Bu çalışmanın amacı, araştırmacılara zaman konusu hakkında bir bakış açısı ve gelecek çalışmalara bir referans kaynağı sunmaktır. Çalışmada, öncelikle doğal bilişsel sistemlerde zaman algısının ve zamansal yeteneklerin temel özellikleri ve bu sistemleri açıklamakta kullanılan zamansal işleme modelleri aktarılmış, sonrasında literatürde yer alan hesaplamalı modellere ve robot modellerine değinilmiştir. Son olarak, bilişsel robotbilim alanındaki çalışmalar irdelenmiş ve olası araştırma konuları aydınlatılmaya çalışılmıştır.

Anahtar Kelimeler—zamansal biliş, zaman algısı, bilişsel robotbilim, bedenlenmiş zihin

I. GİRİŞ

Zaman algısı Kant'ın da belirttiği gibi uzay ile birlikte bilginin imkanını oluşturan temel parametrelerdendir [1]. Tüm biyolojik sistemler fonksiyonlarını zamana bağlı olarak değiştirebilirler; çünkü zamansal bilgi hem çevrenin o anki durumuna hem de geleceğe yöneliktir [2]. Biyolojik sistemlerin zaman algıları sahip oldukları beden büyüklüğüne ve metabolizma hızına bağlıdır. Daha küçük vücuda ve daha büyük metabolizma hızına sahip canlılar zamanı daha yavaş algılar. Evrimsel süreçte beliren bu farklar türün devamı için önemlidir [3]. Canlılar bir mekanda hareket ettiği gibi zamanda da hareket eder; geçmiş, gelecek ve şimdiki zaman arasında ilişkiler kurar, davranışlarını bu bilgilere göre değiştirir ve çeşitlendirirler. Bu nedenle canlıların üç değil, dört boyutlu bir dünyada yaşadığı söylenebilir.

Canlılar gerçek zamanlı çevrede karmaşık davranışlar sergileyen dayanıklı ve adaptif sistemlerdir. Bu açıdan, biyolojik sistemlerin işleyiş biçimleri çevresel değişkenlere karşı daha dayanıklı ve adaptif yapay sistemlerin geliştirilmesi için ilham kaynağı olabilir [4]. Bu nedenle, bedenlenmiş (embodied) yapay zeka yaklaşımları daha dayanıklı ve adaptif sistemler geliştirebilmek için biyolojik sistemlerden ilham alarak etmen (agent), davranış ve çevre arasındaki ilişkiye odaklanırlar [4]. Zamansal bilgi canlılar için önemli olsa da, alandaki yaklaşımların mekansal bilginin kullanımına odaklandığı ve zamansal bilgiye ilişkin çalışmaların yetersiz olduğu belirtilmiştir [5]. Canlı sistemler göz önüne alındığında, zamansal

bilginin nasıl elde edileceği ve diğer duyuşsal, motor ve bilişsel süreçleri destekleyecek biçimde nasıl kullanılacağı dayanıklı ve adaptif sistemler geliştirmek için önemli bir çalışma konusu olabilir.

Toplam üç bölüme ayrılan bu derleme çalışmasının temel amacı zaman algısı çalışmalarının bilişsel robotbilimdeki yerini irdelenmek ve gelecekteki çalışmalar için bir referans kaynağı sunmaktır. İlk bölümde doğal bilişsel sistemlerde zamansal işlemenin temel özellikleri irdelenmiş ve sonraki bölümler için gerekli olan kavramlar aktarılmıştır. İkinci bölümde, literatürde yer alan hesaplamalı modeller ve robot modelleri incelenmiştir. Robot modelleri çerçevesinde, sürekli zamanlı özyinelemeli sinir ağına sahip mobil robotlar üzerinde genetik algoritma kullanan ve bir çok katmanlı nöral ağı gelişimsel robotik perspektifiyle eğiten iki çalışma aktarılmıştır. Son bölümde ise, irdelenen modeller çerçevesinde gelecekte yapılabilecek çalışmalar için öneriler getirilmiştir.

II. DOĞAL BİLİŞSEL SİSTEMLERDE ZAMAN

Hesaplamalı modeller ve robot modellerini açıklamaya geçmeden önce doğal bilişsel sistemlerde zaman algısı ve zaman algısının temel özellikleri kısaca aktarılacaktır.

A. Zaman Algısının Temel Özellikleri

Zamansal bilgi diğer bilgilerden farklı olarak, özelleşmiş bir organa ve beyindeki spesifik bir yolağa bağlı değildir; zamansal bilginin birçok duyuşsal temsilin birleşmesiyle oluştuğu düşünülmektedir [6][7]. Zamansal bilgi sirkadyen, saniye, milisaniye ve mikrosaniye bazlı olarak dört farklı skalada işlenir ve her skala için karşılık gelen davranışlar mevcuttur [8][9]. Zamansal skalalar ve karşılık gelen davranışlar Tablo I'de verilmiştir. Bu derlemede, gerçek zamanlı davranış için öneminden dolayı milisaniye ve saniye bazlı zamanlama üzerinde durulacaktır.

B. Zamansal Yeteneklerin Temel Özellikleri

Canlılar zamansal bilgiyi kullanmaya yönelik çeşitli yeteneklere sahiptir. Bu yetenekler belirli görevlere karşılık gelecek şekilde tanımlanmaktadır. Canlılar bir uyarının süresini tahmin etme konusunda oldukça başarılıdır. Bu yeteneği ölçen görevlere aralıksal zamanlama veya zamansal kestirim görevleri adı verilir. Zamansal kestirim görevleri de zamansal bilginin kullanımına bağlı olarak ikiye ayrılır [10].

Tablo I. ZAMANSAL İŞLEM SKALALARI VE DAVRANIŞLAR

Zamansal İşlem Skalaları	Davranışlar
Mikrosaniyeler	Ses lokalizasyonu Yankıyla yön belirleme Konuşma ve anlama
Milisaniyeler	Hareket tespiti Motor kontrol ve koordinasyon Duyusal zamanlama
Saniyeler	Bilinçli zaman kestirimi
Sirkadyen zamanlama	İştah Uyku-uyanıklık döngüsü Biyolojik döngüler

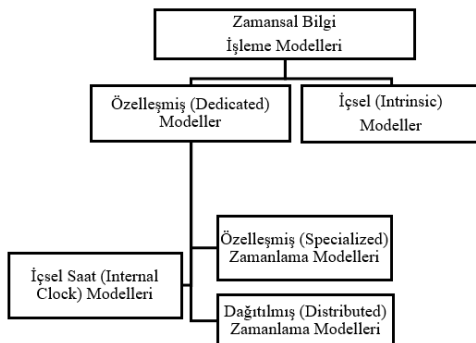
Yalnızca uyarının süresinin tahmin edildiği görevler duyuşal zamanlama; uyarının süresinin ya da uyarılar arası sürenin davranışı yönlendirmek için kullanıldığı görevler motor zamanlama görevleridir. Canlılar bir uyarının süresine yönelik bilgiyi hem farkında olarak hem de farkında olmadan kodlayabilirler. Bu nedenle, zamanlama görevleri geriye ve ileriye dönük zamanlama olarak da ayrılabilir [11]. Eğer görev uyarın gerçekleşikten sonra veriliyorsa, uyarının süresi geriye dönük olarak hatırlanmaya; eğer görev uyarın gerçekleşmeden önce veriliyorsa, süre ileriye dönük olarak açık bir biçimde tutulmaya çalışılır. İnsanlar yalnızca aralıksal zamanlama yeteneğine -bir uyarının süresini kestirme yeteneği- değil, aynı zamanda birden çok uyarının zamansal bilgisini birlikte işleyebilme yeteneğine sahiptir; buna örüntüsel zamanlama denir [12]. Örneğin, mors kodunun kullanılması ancak uyarın sürelerinin arasındaki ilişkinin işlenmesiyle mümkündür. Görevlerin tanımı ve karşılık gelen örnekler Tablo II'de verilmiştir [13].

Skalar özellik adlı fenomene göre tahmin edilecek uyarının süresi arttıkça zamansal kestirimdeki sapma da lineer olarak artar [14]. Bu bulgu fare ve güvercinlerin zamansal kestirimlerinde de görülür [15][16].

C. Zamansal İşleme Modelleri

Hayvanların zamansal işleme mekanizmalarını açıklamaya çalışan iki temel model mevcuttur. Özelleşmiş (dedicated) modeller zamansal bilginin işlenebilmesi için beyinde özelleşmiş bir sistemin varlığını savunurken, içsel (intrinsic) modeller nöral ağların kendi başlarına zamansal bilgiyi işleyebileceklerini savunur [10][17]. Özelleşmiş modeller içsel saat (internal clock) modellerinin çeşitli biçimlerini içerirler [18][19]. Modeller ve çeşitlenmeleri Şekil 1'de verilmiştir.

1) *İçsel saat teorisi*: İçsel saat teorisine göre, bir içsel saat fiziksel zamanı subjektif zamana dönüştürür. Bu teori hem Treisman [20] tarafından yürütülen çalışmaların hem de Gibbon ve arkadaşları tarafından [21] hayvanlar üzerinde yapılan



Şekil 1. Zamansal bilgi işleme modelleri

Tablo II. ZAMANLAMA GÖREVLERİ VE ÖZELLİKLERİ

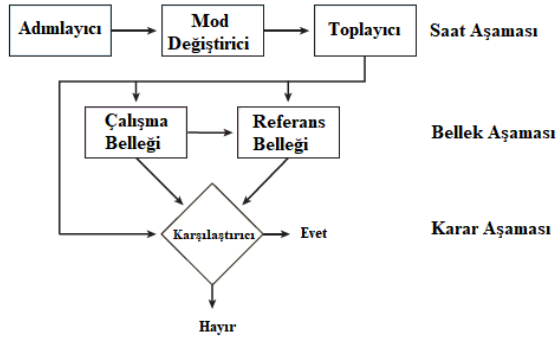
Görevler	Davranış Tanımları	Örnekler
Duyusal Zamanlama	Uyarının süresinin kestirilmesi	Lambanın yanma süresini kestirmek
Motor Zamanlama	Davranışın ne zaman gerçekleştirileceğinin veya ne kadar sürdürüleceğinin öğrenilmesi	Lamba söndükten sonra, lambanın yandığı süre miktarına masaya vurmak
Geriye Dönük Zamanlama	Görevin uyarandan sonra verilmesi	Lamba söndükten sonra, lambanın yanma süresini geriye dönük olarak hatırlamak
İleriye Dönük Zamanlama	Görevin uyarandan önce verilmesi	Lamba yanmadan önce, lambanın yanma süresini ileriye dönük olarak tahmin etmeye çalışmak
Örüntüsel Zamanlama	Birden fazla olayın sürelerinin işlenmesi	Mors kodunu işlemek

sabit aralıklı pekiştirmeli öğrenme prosedürünün ürünüdür. Skinner [22] tarafından geliştirilen sabit aralıklı pekiştirme prosedüründe, deneye ödül sabit zaman aralıklarıyla verilir; fakat denek ödüle erişebilmek için öğretilmek istenen davranışı ödülün verileceği zaman geldiğinde gerçekleştirmelidir (motor zamanlama). Bir süre sonra canlı, çevrede hiçbir işaret olmasına rağmen ödüllerin ne kadar sürede bir verildiğini öğrenir. İçsel saat teorisi, bu yeteneği açıklamak için geliştirilmiştir.

İçsel saat, saat, bellek ve karar aşamalarından oluşur. Saat aşamasında zamansal bilgi edinilir, bellek aşamasında uyarının süresi karşılaştırılır ve karar aşamasında karar verilir. Saat kısmında adımlayıcı adı verilen yapı ritmik vuruşlar üreterek bunları toplayıcıya gönderir. Bu bilgi belleğe geçerek çalışma belleği ve referans belleğine ulaşır. Çalışma belleği güncel adım sayısını tutarken, referans belleği daha önce öğrenilen zamanı tutar. Çalışma belleğindeki güncel adım sayısı ile referans belleğindeki referans uzunluk karşılaştırılarak davranışa karar verilir [23]. İçsel saat bilgi işleme modeli Şekil 2'de verilmiştir.

Özelleşmiş modeller, özelleşmiş zamanlama (specialized timing) ve dağıtılmış zamanlama (distributed timing) modelleri olarak iki gruba daha ayrılabilirler [24][25]. Özelleşmiş zamanlamaya göre içsel saat bir beyin bölgesine (serebellum [26], bazal ganglion [27], destekleyici motor bölgesi [28] veya sağ prefrontal korteks [29]) konumlanmışken, dağıtılmış zamanlamaya göre içsel saatin aşamaları beyinde dağıtılmış durumdadır. İçsel saat modellerinin başarılarından biri deneysel manipülasyonlar yoluyla saatin çalışma hızının değiştirilebilmesi ve skalar özellik fenomenini açıklayabilesidir [30][31][20][32]. Örneğin, tekrarlı olarak verilen görsel ve işitsel uyarıların, adımlayıcının vuruş (salınım) frekansını değiştirerek katılımcıların aralıksal zamanlama performanslarını etkilediği gösterilmiş ve bulgular bilgisayar simülasyonu ile desteklenmiştir [33][34]. Zamansal kestirimin doğruluğuna yönelik bireysel farklılıklar algı ve davranış açısından benzer etkiler gösterir [35]. Bu bulgular zamansal bilginin modaliteden bağımsız olduğunu gösterse ve içsel saat teorisini desteklese de, literatürdeki bulgular çelişkilidir. Örneğin, görsel ve işitsel sistemler için farklı eşik değerleri mevcuttur [11]; duyuşal ve motor zamanlama yetenekleri için farklı mekanizmalar önerilmiştir [36]. Her ne kadar içsel saat modeli en etkili bilişsel model olsa da, saatin beyinde konumlanması halen tartışma konusudur. İlgili beyin bölgelerinin bir listesi kaynakçada verilmiştir [23].

2) *İçsel modeller*: İçsel modeller zamansal bilginin nöral ağlar tarafından işlenebileceğini dolayısıyla zamansal bilgi için



Şekil 2. İçsel saat bilgi işleme modeli. Türkçeye uyarlanmıştır [23].

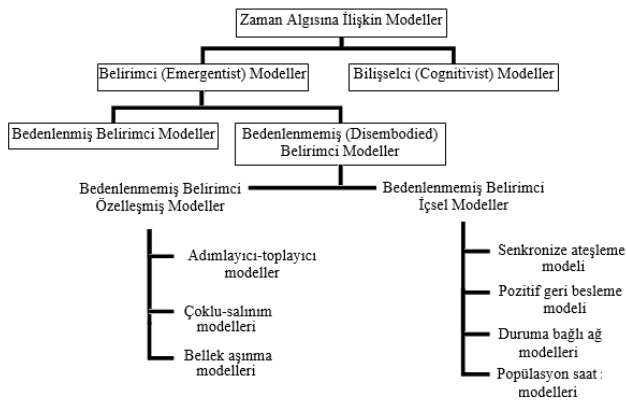
özelleşmiş bir yapının bulunmadığını savunur. İçsel modeller modalite ve görev bazlı performans farklılıklarını özelleşmiş modellere göre daha iyi açıklar [37]. Fakat, modaliteler arasındaki zamansal bilgi geçişlerini açıklamakta zorlanırlar [24]. İçsel modeller için geliştirilen teoriler nöral süreçleri temel alır ve bu nedenle birçok hesaplamalı içsel model geliştirilmiştir. Bu modeller bir sonraki kısımda detaylandırılacaktır.

III. ZAMAN ALGISINA İLİŞKİN ROBOT MODELLERİ

Vernon ve arkadaşlarına [38] göre modeller bilişselci (cognitivist) ve belirimci (emergentist) olarak iki gruba ayrılabilir. Bilişselci modeller bilgi işlemeye ve sembol manipülasyonuna dayanırken, belirimci modeller otonom sistemlerin çevre ile ilişkisinden doğan yeteneklere odaklanır. Bilişselci modeller için modellerin somutlaşması sistemin işleyişi açısından önemsizken, belirimci modeller için kaçınılmazdır [38]. Bu bölümde zaman algısına yönelik belirimci modeller incelenecektir. ACT-R ve Soar gibi bilişselci modeller için [31] ve [39], zamansal bilgiyi diğer bilişsel süreçlere entegre etmeye çalışan modeller için [40] incelenebilir. Zaman algısına ilişkin aktarılabilecek model türleri Şekil 3'de verilmiştir.

A. Bedenlenmemiş (Disembodied) Belirimci Modeller

Bir sistemin bedenlenmiş veya somutlaşmış olmasının ne anlama geldiği tartışmalı bir konudur. Bir sistem fiziksel, biyolojik, sosyal ve tarihsel açıdan bedenlenmiş veya somutlaşmış olabilir [41][42]. Burada bu tartışmaya girmek adına, bedenlenmiş modeller öznel deneyim ve tecrübelerini çevreleriyle kurdukları duyuşal ve bedensel ilişki yoluyla oluşturan modeller olarak tanımlanmıştır [43]. Bedenlenmemiş



Şekil 3. Zaman algısına ilişkin modeller

modeller ise deneyim ve tecrübe açısından etmen, çevre ve davranış arasındaki ilişkiye vurgu yapmayan modellerdir.

1) *Bedenlenmemiş Belirimci Özelleşmiş Modeller:* Bedenlenmemiş belirimci modeller genellikle nörobilimsel çalışmaları temel alan modellerden oluşmaktadırlar. Bu bölümde özelleşmiş ve belirimci içsel modeller aktarılabilecektir. İçsel saat teorisinin varsayımlarına dayanarak adımlayıcı-toplayıcı ve çoklu-salınım modelleri adında iki grup özelleşmiş model tanımlanmıştır.

a) *Adımlayıcı-toplayıcı modeller:* Adımlayıcı-toplayıcı modeller içsel saat teorisine uygun şekilde üç aşama varsayar. Komonsinski ve Kups [39], iki uyarının süresini karşılaştırmak konusunda insan performansını taklit etmek için, bilgisayar yazılımı üzerinde çalışan nöral ağ tabanlı bir adımlayıcı-toplayıcı model geliştirmiştir. Her ne kadar model bir nöral ağ biçiminde oluşturulmuş olsa da, nöronların gerçekleştirdiği fonksiyonlar önceden tanımlanmıştır. Sistem toplam 7 fonksiyon içermektedir; bunlardan bazıları vuruş oluşturmaya sağlayan üretici, vuruşların toplanmasını sağlayan toplam veya vuruşların iletilmesini geciktiren gecikme gibi fonksiyonlardır. Bu fonksiyonların birleştirilmesiyle, içsel saat teorisindeki modüllere benzer şekilde modüller oluşturulmuştur. Model önceden tanımlanan fonksiyonlarla oluşturulduğundan ve bir yeteneğin edinilmesini temel almadığından belirimci bir model olmaktan uzaktır.

b) *Çoklu-salınım modelleri:* Çoklu-salınım modellerine göre beyin spesifik bölgeleri salınım yayarak adımlayıcı gibi, bazı bölgeleri ise bu salınımlara karşılık veren toplayıcı gibi çalışır. Bu teoriyi temel alan bir algılayıcı (perceptron) modeli Buhusi ve Oprisan [44] tarafından aralıklı pekiştirme prosedüründeki motor zamanlama performansı için geliştirilmiştir. Algılayıcı salınım adı verilen girdi nöronlarından ve bellek adı verilen çıktı nöronlarından oluşur. Salınım nöronları her turda belirli bir aralıkta salınır ve aktivasyonunu bellek nöronlarına gönderir. Eğer ödüle erişilen denemelerde edinilen aktivasyon miktarı ile salınım nöronlarından gönderilen aktivasyon miktarı eşitse bellek nöronları toplayıcı modülü gibi davranarak aktifleşir. Böylece model ödülün ne zaman geleceğini diğer bir deyişle davranışın ne zaman gerçekleştirilmesi gerektiğini öğrenir. Modelin skalar özelliğe sahip olabilmesi için nöron grupları arasındaki bağlantılarda gürültü oluşturulmuştur. Ayrıca zaman algısı üzerindeki farmakolojik etkileri açıklamak için dopaminerjik sistem salınım nöronlarına ve kolinerjik sistem bellek nöronlarına eklenmiştir.

c) *Bellek aşınma modelleri:* Bellekteki aşınma süreçlerinin zaman algısını oluşturduğunu savunan modellere bellek aşınma modelleri adı verilir. Bu tip modellerden biri Addyman ve Mareschal [45] tarafından geliştirilen ve bir aralıklı zamanlama modeli olan nöral ağ tabanlı GAMIT-net adlı modeldir. Model, belleği simüle edebilmek için bir normal dağılım eğrisinden ve bu bilgiyi kullanarak zamansal kestirim yapabilecek bir özyinelemeli sinir ağından oluşmuştur. Modelin en önemli özelliklerinden biri ileriye ve geriye dönük zamanlama performansını yakalayabilmesidir. Bunu gösterebilmek için araştırmacılar, 220 girdi, 20 saklı katman ve 20 çıktı nöronundan oluşan özyinelemeli bir nöral ağı 2500 olaydan oluşacak şekilde 25 epok boyunca eğitmişlerdir. Her bir epok için 50 adet normal dağılım eğrisi ve ağıın olayın süresiyle ilgili hedefi için eğri başına 50 adet değer üretmişlerdir. Bununla birlikte, değerler ileriye ve geriye dönük zamanlama eğitiminde

kullanılacak şekilde iki gruba ayrılmıştır. Geriye dönük zamanlama eğitiminde nöral ağ, test edilecek olayın başlangıcında ve test kısmında eğitilirken; ileriye dönük zamanlama eğitiminde, zamanlama görevinin olay başlamadan verilmesini simüle etmek için olay sürerken de eğitilmiştir. Ağın performansı eğitim boyunca ideal performansa yaklaşmıştır. Ayrıca model, canlılarda olduğu gibi skalar özellik göstermekte; bilişsel yükün ve dikkatin zaman üzerindeki etkilerini yakalayabilmektedir.

2) *Bedenlenmemiş Belirimci İçsel Modeller:* Nöronların bir grup olarak veya kendi başlarına zamansal bilgiyi işleyebileceklerini savunan modellerdir. Bu modeller nöronların zamansal bilgiyi işleme mekanizmalarını açığa çıkarmak için geliştirilmişlerdir; bu nedenle, milisaniye bazlı zamanlama konusunda başarılıdır. Ayrıca, her bir model zamansal işleme konusunda farklı nöron tiplerini kullanmaktadır. Bu tip modellerin en büyük problemlerinden biri uygulama alanlarının 10 ms ila 100 ms arasında kalmasıdır [30][24][46].

Senkronize ateşleme modeline göre katmanlar halinde dizilen ve senkronize olarak ateşlenen nöron grupları uyaranların sürelerini işleyebilir [47]. Uyarana ilişkin aktivasyon, nöron katmanları arasında aktarılır ve her bir katmanda gecikmeye uğrar; toplam gecikme miktarı ise uyarının süresini verir [47]. Senkronize ateşleme modeli motor zamanlama için geliştirilmese de, bu ağların motor zamanlama ve zamansal örüntü yeteneklerini modellemek için kullanılabileceği düşünülmektedir [11].

Bir nörohesaplamalı model olan pozitif geri besleme modelinin temel amacı canlıların sabit aralıklı pekiştirme prosedüründeki performanslarını açıklamaktır [48]. Model, zamanı prosedür süresince elde edilen ödülün bir fonksiyonu olarak ele alır. Model yalnızca milisaniye bazlı zaman aralıklarını değil aynı zamanda saniye bazında aralıkları temsil etmek için de kullanılabilir. Fakat zamansal örüntü işleme, geriye dönük zamansal kestirim ve motor zamanlama yeteneklerini açıklayamamaktadır [11].

Duruma bağlı ağ ve popülasyon saat modeli adında iki adet model milisaniye bazlı duysal ve motor zamanlama yeteneklerini açıklamak için özyinelemeli nöral ağlar temel alınarak geliştirilmiştir [36]. Duysal zamanlama yeteneğine odaklanan duruma bağlı ağ modelinde nöron grupları hem mevcut girdiye hem de ağın durumuna göre uyaranların süresini işler. Bu nedenle uyaranların sürelerinin arasındaki ilişkiye de duyarlıdır [49]. Duruma bağlı ağlar kullanılarak yürütülmüş birçok çalışma mevcuttur [49][50][51][52]. Benzer varsayımlara sahip olarak geliştirilen popülasyon saat modelleri, özyinelemeli sinir ağı kullanarak motor zamanlama için gereken zamansal bilgiyi tekrar üretmeye çalışır [36]. Popülasyon saatleri motor zamanlama için daha uzun süreler öngörür [24]. Aynı nöral organizasyonun farklı davranışlara yol açmasının verimli bir çözüm olduğu düşünüldüğünde, bu durumun her iki model için de avantajlı olduğu söylenebilir. Goudar ve Buonomano [53], duysal-motor bilginin aynı özyinelemeli nöral ağ üzerinde işlenebileceğini göstermiştir. Çalışmada farklı sürelerle sahip işitsel olarak ağa verilen rakamların bilgisini motor örüntülere çevirebilen bir model geliştirilmiştir. Bu çalışmanın önemi, özyinelemeli sinir ağlarının duysal ve motor zamanlamayı birlikte yapabilmesidir. Her iki model de ileriye dönük zamanlama yeteneğine sahipken, geriye dönük zamanlama yeteneğini açıklayamamaktadır. Bununla birlikte, her iki modelin de zamansal örüntüyü işleme konusunda başarılı olduğu

düşünülmektedir [11].

B. Bedenlenmiş Belirimci Modeller

Güncel araştırmalar bedensel ve duygusal durumların zamansal deneyim üzerinde etkili olduğunu göstermektedir [54]. Zamansal temsili, duygusal ve bedensel durumların oluşturduğunu düşünen araştırmacılar da mevcuttur [55][56]. Örneğin, Craig'e [55] göre insular korteksin ön bölgesi, bedensel durumlarla motivasyonel faktörleri entegre ederek zamansal temsiller yaratır. Davranışlar ve zamansal temsiller arasındaki ilişkide genellikle yardımcı motor alan üzerinde durulur [57][58]. Zamanı bedenlenmiş perspektiften ele alan Addyman ve arkadaşlarının [59] bebeklerle yürüttüğü bir çalışmada, 4, 6 ve 8 aylık bebeklerin kolları, deneyci tarafından sosyal sinyal verildikten sonra havaya kaldırılmıştır. Test aşamasında, 6 ve 8 aylık bebeklerin elektromiyografi sinyallerinde zamansal kestirim yaptıklarına yönelik işaretler bulunmuştur. Araştırmacılar bunun nedeninin 4 aylık bebeklere kıyasla, 6 ve 8 aylık bebeklerin daha gelişmiş motor kabiliyetleri olduğunu düşünmektedirler. Bu bilgiler göz önüne alındığında zamansal bilginin kullanımının etmen, çevre ve davranış arasındaki ilişkiden doğan bir yeteneğe işaret ettiği söylenebilir. Bu bölümde literatürdeki bedenlenmiş belirimci modeller irdelenecektir. Zaman kavramı ve bedenlenmiş biliş yaklaşımları arasındaki ilişkiye dair daha detaylı bir inceleme için [60] incelenebilir.

1) *Gelişimsel Robot Modeli:* İlk bedenlenmiş belirimci model Addyman ve arkadaşları [61] tarafından zamansal kestirim performansını açıklamak için geliştirilmiştir. Bellek aşınma teorisini baz alan model, bellekteki aşınmanın zamansal bilgiye çevrilebilmesi için duysal-motor süreçlere temellenmesi gerektiğini savunur. Bir bebek, oyuncakla karşılaştığında ona ulaşmak için bir davranış gösterir. Bellekteki bilgi aşınmaya devam ederken, bebek tarafından oyuncığa erişme davranışı gerçekleştirilir. Böylece gelişimsel süreçte bellekteki bilginin aşınma süresi ile gerçek zamanlı davranış arasında ilişki kurulmuş olur. Daha sonra bu ilişki bir uyarana yönelik zamansal kestirimde kullanılır. Addyman ve arkadaşları [61], bu hipotezi test edebilmek için 41 girdi nöronuna, 10 nöronluk bir saklı katmana ve kol hareketlerini kodlayan 10 adet çıktı nöronuna sahip bir nöral ağ geliştirmiştir. Nöral ağın girdisi normal dağılım yoluyla simüle edilen görsel ve işitsel bilgiyken; çıktısı onluk bir liste şeklinde kodlanan kol hareketleridir. Ağ verilen bilgi ve ona karşılık gelecek sürede olduğu düşünülen kol hareketi girdinin etiketi olacak şekilde nöral ağ güdümlü bir biçimde eğitilmiştir. Modelin başarılarından biri skalar özellik göstermesi diğeri ise eğitim sürecinde simüle edilen görsel ve işitsel uyaranların sürelerine dair kestirimlerin yakınsamasıdır. Geriye dönük zamansal kestirim ve örüntüsel zamanlama yeteneklerini açıklayamaması modelin eksikliklerindendir. Model fiziksel bir model değildir; fakat beden bilişsel sistem üzerindeki etkisini simüle ettiğinden bedenlenmiş bir model olarak kabul edilebilir. Ayrıca, güdümlü olarak eğitilen nöral ağın girdileri çevreden alınmamış, duysal bilgiler ve bunlara karşılık gelen davranışlar varsayımsal olarak üretilmiştir.

2) *Mobil Robot Modeli:* Zamansal kestirim performansını ele alan başka bir çalışma Maniadakis ve arkadaşları [62] tarafından yürütülmüştür. Çalışmanın amacı sürekli zamanlı bir özyinelemeli nöral ağ kullanarak duysal ve motor zamanlama

yapabilen bir sistem geliştirmektir. Çalışmada uzaklık, ışık ve ses sensörlerine sahip ve simülasyon ortamında geliştirilen bir mobil robot kullanılmıştır. Uzaklık sensörü navigasyon için, ışık sensörü görevler arasındaki değişimin gerçekleştirilmesi için ve ses sensörü zamansal kestirimi yapılacak uyarının tespiti için seçilmiştir. Özyinelemeli nöral ağ üç katmana ayrılmış, orta seviyedeki nöronlar duyuşsal bilgi ile beslenmiştir ve nöral bağlantılar genetik algoritma ile belirlenmiştir. Çalışmada duyuşsal ve motor zamanlama performansları gerektiren iki görev kullanılmıştır. Duyuşsal zamanlama görevinde mobil robotun, verilen iki sesin uzunluğuna bağlı olarak bir koridorun sonundaki iki noktadan birini seçmesi; motor zamanlama görevinde ise sesin uzunluğu süresince hareket etmesi gerekmektedir. Her iki görevi de başarıyla yerine getiren mobil robotun katmanlarının aktivasyonu inceleyen araştırmacılar, her üç katmanda da bazı nöronların salınım gösterdiği ve bu durumun genel olarak özelleşmiş modellerin özel olarak çoklu-salınım modellerinin varsayımlarıyla uyduğu sonucuna varmışlardır. Bununla beraber, aynı nöronların davranış kontrolünde de rol oynadığını belirten araştırmacılar, bu durumun bedenleşmiş yaklaşımın varsayımlarıyla da uyumlu olduğunu düşünmektedirler. Model hem duyuşsal hem de motor görevlerde başarılıdır. Bununla birlikte, model ileriye dönük zamansal kestirim yapabilmekte fakat geriye dönük zamansal kestirim yapamamaktadır. Söz konusu çalışma [62], modeli eğitmek için genetik algoritma kullandığından Addyman ve arkadaşlarının [61] modeline kıyasla biyolojik açıdan daha makul görülebilir. Araştırmacıların dahil olduğu zamansal temsil, kural değiştirme ve yönetici işlevler ile ilgili benzer çalışmalar kaynakçada verilmiştir [63][64][65][66]. Maniadakis ve Trahanias [65] tarafından yürütülen güncel bir çalışmada, duyuşsal ve motor zamanlama görevlerine ek olarak, geçmiş kategorizasyonu -bir olayın uzak geçmişte mi yoksa yakın geçmişte mi gerçekleştiği- görevi de robotun repertuarına eklenmiştir.

IV. TARTIŞMA

Zamansal bilişin yüksek seviye bilişsel yetenekler ve bedenlenmiş yapay zeka sistemleri için önemi literatürde belirtilmiştir [41][67][60]. Bu derleme çalışmasında, hem doğal sistemlerde hem de hesaplamalı modeller ve robot modellerinde zamansal bilginin işlenmesiyle ilgili çalışmalar sunulmuştur.

- Aktarılan bedenlenmiş belirimci modeller zamansal bilgiyi yetkin bir biçimde kullanabilmek için yeterli morfolojiye sahip olmayabilir. Örneğin, bir grup çalışma mobil robotlarla gerçekleştirilmiş [40][63][64][66], diğer çalışmada ise [61], modelin davranışları sürekli biçimde temsil edilmemiş ve içsel duyular göz önüne alınmamıştır. Gelecek çalışmalarda, insansı robotlar kullanılarak bu çalışmalar geliştirilebilir.
- Kullanılan öğrenme yöntemleri güdümsüz hale getirilebilir. Mobil robotlarla yapılan çalışmada genetik algoritma kullanılmıştır [62]. Addyman ve arkadaşları [61] tarafından yürütülen çalışma gelişimsel süreçlerden ilham almış olsa da, model güdümlü biçimde geliştirilmiştir.
- Bedenlenmemiş belirimci modeller insan performansını modellemeye çalışmakta ve bedenlenmiş mod-

ellerden daha başarılı sonuçlar vermektedir. Bu nedenle, bedenlenmemiş belirimci modeller bedenlenmiş ve gelişimsel bakış açısıyla tekrar geliştirilebilir.

- Bedenlenmiş belirimci modeller, her ne kadar zamana yönelik yeteneklerin bir kısmını yakalayabilse de, bedenlenmemiş belirimci modeller kadar zengin değildir. Zamansal örüntü işleme ve oluşturma bu konuda iyi bir örnek olabilir.
- Her ne kadar bu çalışmada özel olarak hedef alınmasa da, zamansal bilginin duyuşsal, motor ve bilişsel süreçlere entegre edilmesi daha adaptif ve yetenekli sistemler geliştirilmesine yardımcı olabilir.

KAYNAKÇA

- [1] D. Burnham, *Kant's Critique of Pure Reason*. Indiana University Press, 2008.
- [2] D. Mihailović, I. Balaž, and D. Kapor, "Time in biology," in *Developments in Environmental Modelling*, vol. 29, Elsevier, 2017, pp. 51–55.
- [3] K. Healy, L. McNally, G. D. Ruxton, N. Cooper, and A. L. Jackson, "Metabolic rate and body size are linked with perception of temporal information," *Animal Behaviour*, vol. 86, no. 4, pp. 685–696, 2013.
- [4] R. Pfeifer, M. Lungarella, and F. Iida, "Self-organization, embodiment, and biologically inspired robotics," *science*, vol. 318, no. 5853, pp. 1088–1093, 2007.
- [5] M. Maniadakis and P. Trahanias, "Temporal cognition: A key ingredient of intelligent systems," *Frontiers in neurorobotics*, vol. 5, p. 2, 2011.
- [6] W. J. Matthews and W. H. Meck, "Time perception: The bad news and the good," *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, vol. 5, no. 4, pp. 429–446, 2014.
- [7] M. Wittmann, "Time perception and temporal processing levels of the brain," *Chronobiology international*, vol. 16, no. 1, pp. 17–32, 1999.
- [8] R. A. Block and S. Grondin, "Timing and time perception: A selective review and commentary on recent reviews," *Frontiers in psychology*, vol. 5, p. 648, 2014.
- [9] C. V. Buhusi and W. H. Meck, "What makes us tick? functional and neural mechanisms of interval timing," *Nature reviews neuroscience*, vol. 6, no. 10, p. 755, 2005.
- [10] R. Fontes, J. Ribeiro, D. S. Gupta, D. Machado, F. Lopes-Júnior, F. Magalhães, V. H. Bastos, K. Rocha, V. Marinho, G. Lima, *et al.*, "Time perception mechanisms at central nervous system," *Neurology international*, vol. 8, no. 1, 2016.
- [11] J. Dzaack, S. Trösterer, N. Pape, and L. Urbas, "A computational model of retrospective time estimation," *Cognitive Systems Research*, vol. 8, no. 3, pp. 208–215, 2007.
- [12] N. F. Hardy and D. V. Buonomano, "Neurocomputational models of interval and pattern timing," *Current Opinion in Behavioral Sciences*, vol. 8, pp. 250–257, 2016.
- [13] M. D. Mauk and D. V. Buonomano, "The neural basis of temporal processing," *Annu. Rev. Neurosci.*, vol. 27, pp. 307–340, 2004.
- [14] C. Addyman, R. M. French, and E. Thomas, "Computational models of interval timing," *Current Opinion in Behavioral Sciences*, vol. 8, pp. 140–146, 2016.
- [15] C. V. Buhusi, D. Aziz, D. Winslow, R. E. Carter, J. E. Swearingen, and M. C. Buhusi, "Interval timing accuracy and scalar timing in c57bl/6 mice," *Behavioral neuroscience*, vol. 123, no. 5, p. 1102, 2009.
- [16] C. Malapani and S. Fairhurst, "Scalar timing in animals and humans," *Learning and Motivation*, vol. 33, no. 1, pp. 156–176, 2002.
- [17] K. Jantzen, F. Steinberg, and J. Kelso, "Functional mri reveals the existence of modality and coordination-dependent timing networks," *Neuroimage*, vol. 25, no. 4, pp. 1031–1042, 2005.
- [18] R. M. Church, "Properties of the internal clock a," *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 423, no. 1, pp. 566–582, 1984.
- [19] W. H. Meck, "Attentional bias between modalities: Effect on the internal clock, memory, and decision stages used in animal time discrimination a," *Annals of the New York Academy of sciences*, vol. 423, no. 1, pp. 528–541, 1984.
- [20] M. Treisman, "Temporal discrimination and the indifference interval: Implications for a model of the "internal clock",," *Psychological Monographs: General and Applied*, vol. 77, no. 13, p. 1, 1963.

- [21] J. Gibbon, R. M. Church, and W. H. Meck, "Scalar timing in memory," *Annals of the New York Academy of sciences*, vol. 423, no. 1, pp. 52–77, 1984.
- [22] B. F. Skinner, *The behavior of organisms: An experimental analysis*. BF Skinner Foundation, 1990.
- [23] M. J. Allman, S. Teki, T. D. Griffiths, and W. H. Meck, "Properties of the internal clock: First- and second-order principles of subjective time," *Annual review of psychology*, vol. 65, pp. 743–771, 2014.
- [24] R. B. Ivry and J. E. Schlerf, "Dedicated and intrinsic models of time perception," *Trends in cognitive sciences*, vol. 12, no. 7, pp. 273–280, 2008.
- [25] W. H. Meck, "Neuropsychology of timing and time perception," *Brain and cognition*, vol. 58, no. 1, pp. 1–8, 2005.
- [26] R. B. Ivry, R. M. Spencer, H. N. Zelaznik, and J. Diedrichsen, "The cerebellum and event timing," *Annals of the new York Academy of Sciences*, vol. 978, no. 1, pp. 302–317, 2002.
- [27] D. L. Harrington, K. Y. Haaland, and N. Hermanowitz, "Temporal processing in the basal ganglia," *Neuropsychology*, vol. 12, no. 1, p. 3, 1998.
- [28] F. Macar, J. Coull, and F. Vidal, "The supplementary motor area in motor and perceptual time processing: Fmri studies," *Cognitive processing*, vol. 7, no. 2, pp. 89–94, 2006.
- [29] P. A. Lewis and R. Miall, "A right hemispheric prefrontal system for cognitive time measurement," *Behavioural Processes*, vol. 71, no. 2-3, pp. 226–234, 2006.
- [30] R. A. Block and R. P. Gruber, "Time perception, attention, and memory: A selective review," *Acta Psychologica*, vol. 149, pp. 129–133, 2014.
- [31] K. Anamalamudi, B. R. Surampudi, and M. Maganti, "Computational models of time perception," in *2014 First International Conference on Networks & Soft Computing (ICNSC2014)*, IEEE, 2014, pp. 413–417.
- [32] S. Grondin and R. Rousseau, "Judging the relative duration of multimodal short empty time intervals," *Perception & Psychophysics*, vol. 49, no. 3, pp. 245–256, 1991.
- [33] M. Treisman, A. Faulkner, P. L. Naish, and D. Brogan, "The internal clock: Evidence for a temporal oscillator underlying time perception with some estimates of its characteristic frequency," *Perception*, vol. 19, no. 6, pp. 705–742, 1990.
- [34] M. Treisman and D. Brogan, "Time perception and the internal clock: Effects of visual flicker on the temporal oscillator," *European journal of cognitive psychology*, vol. 4, no. 1, pp. 41–70, 1992.
- [35] S. W. Keele, R. A. Pokorny, D. M. Corcos, and R. Ivry, "Do perception and motor production share common timing mechanisms: A correlational analysis," *Acta psychologica*, vol. 60, no. 2-3, pp. 173–191, 1985.
- [36] D. V. Buonomano and R. Laje, "Population clocks: Motor timing with neural dynamics," in *Space, Time and Number in the Brain*, Elsevier, 2011, pp. 71–85.
- [37] R. M. Spencer, U. Karmarkar, and R. B. Ivry, "Evaluating dedicated and intrinsic models of temporal encoding by varying context," *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 364, no. 1525, pp. 1853–1863, 2009.
- [38] D. Vernon, G. Metta, and G. Sandini, "A survey of artificial cognitive systems: Implications for the autonomous development of mental capabilities in computational agents," *IEEE transactions on evolutionary computation*, vol. 11, no. 2, pp. 151–180, 2007.
- [39] M. Komosinski and A. Kups, "Time-order error and scalar variance in a computational model of human timing: Simulations and predictions," *Computational Cognitive Science*, vol. 1, no. 1, p. 3, 2015.
- [40] M. Maniadakis and P. Trahanias, "Time models and cognitive processes: A review," *Frontiers in neurorobotics*, vol. 8, p. 7, 2014.
- [41] T. Ziemke, "What's that thing called embodiment?" In *Proceedings of the annual meeting of the cognitive science society*, vol. 25, 2003.
- [42] T. Ziemke, "Embodied ai as science: Models of embodied cognition, embodied models of cognition, or both?" In *Embodied artificial intelligence*, Springer, 2004, pp. 27–36.
- [43] K. Mainzer, "From embodied mind to embodied robotics: Humanities and system theoretical aspects," *Journal of Physiology-Paris*, vol. 103, no. 3-5, pp. 296–304, 2009.
- [44] C. V. Buhusi and S. A. Oprisan, "Time-scale invariance as an emergent property in a perceptron with realistic, noisy neurons," *Behavioural Processes*, vol. 95, pp. 60–70, 2013.
- [45] C. Addyman and D. Mareschal, "Gamit-net: Retrospective and prospective interval timing in a single neural network," in *Proceedings of the Annual Meeting of the Cognitive Science Society*, vol. 36, 2014.
- [46] J. J. Paton and D. V. Buonomano, "The neural basis of timing: Distributed mechanisms for diverse functions," *Neuron*, vol. 98, no. 4, pp. 687–705, 2018.
- [47] J. Haß, S. Blaschke, T. Rammsayer, and J. M. Herrmann, "A neurocomputational model for optimal temporal processing," *Journal of computational neuroscience*, vol. 25, no. 3, pp. 449–464, 2008.
- [48] J. P. Gavornik, M. G. H. Shuler, Y. Loewenstein, M. F. Bear, and H. Z. Shouval, "Learning reward timing in cortex through reward dependent expression of synaptic plasticity," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 106, no. 16, pp. 6826–6831, 2009.
- [49] O. Pérez and H. Merchant, "The synaptic properties of cells define the hallmarks of interval timing in a recurrent neural network," *Journal of Neuroscience*, vol. 38, no. 17, pp. 4186–4199, 2018.
- [50] D. V. Buonomano and M. M. Merzenich, "Temporal information transformed into a spatial code by a neural network with realistic properties," *Science*, vol. 267, no. 5200, pp. 1028–1030, 1995.
- [51] D. V. Buonomano and W. Maass, "State-dependent computations: Spatiotemporal processing in cortical networks," *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 10, no. 2, p. 113, 2009.
- [52] N. Hardy and D. V. Buonomano, "Encoding time in feedforward trajectories of a recurrent neural network model," *Neural computation*, vol. 30, no. 2, pp. 378–396, 2018.
- [53] V. Goudar and D. V. Buonomano, "Encoding sensory and motor patterns as time-invariant trajectories in recurrent neural networks," *Elife*, vol. 7, e31134, 2018.
- [54] M. Wittmann, "The inner sense of time: How the brain creates a representation of duration," *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 14, no. 3, p. 217, 2013.
- [55] A. D. Craig and A. Craig, "How do you feel—now? the anterior insula and human awareness," *Nature reviews neuroscience*, vol. 10, no. 1, 2009.
- [56] D. Di Lernia, S. Serino, G. Pezzulo, E. Pedrolì, P. Cipresso, and G. Riva, "Feel the time. time perception as a function of interoceptive processing," *Frontiers in Human Neuroscience*, vol. 12, p. 74, 2018.
- [57] H. Merchant and K. Yarrow, "How the motor system both encodes and influences our sense of time," *Current Opinion in Behavioral Sciences*, vol. 8, pp. 22–27, 2016.
- [58] J. T. Coull, F. Vidal, and B. Burle, "When to act, or not to act: That's the sma's question," *Current Opinion in Behavioral Sciences*, vol. 8, pp. 14–21, 2016.
- [59] C. Addyman, S. Rocha, L. Fautrelle, R. M. French, E. Thomas, and D. Mareschal, "Embodiment and the origin of interval timing: Kinematic and electromyographic data," *Experimental brain research*, vol. 235, no. 3, pp. 923–930, 2017.
- [60] A. Kranjec and A. Chatterjee, "Are temporal concepts embodied? a challenge for cognitive neuroscience," *Frontiers in Psychology*, vol. 1, p. 240, 2010.
- [61] C. Addyman, R. French, D. Mareschal, and E. Thomas, "Learning to perceive time: A connectionist, memory-decay model of the development of interval timing in infants," in *Proceedings of the Annual Meeting of the Cognitive Science Society*, vol. 33, 2011.
- [62] M. Maniadakis, E. Hourdakis, and P. Trahanias, "Robotic interval timing based on active oscillations," *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, vol. 126, pp. 72–81, 2014.
- [63] M. Maniadakis, M. Wittmann, and P. E. Trahanias, "Time experiencing by robotic agents," in *ESANN*, 2011.
- [64] M. Maniadakis, P. Trahanias, and J. Tani, "Explorations on artificial time perception," *Neural Networks*, vol. 22, no. 5-6, pp. 509–517, 2009.
- [65] M. Maniadakis and P. Trahanias, "Integrated intrinsic and dedicated representations of time: A computational study involving robotic agents," *Timing & Time Perception*, vol. 3, no. 3-4, pp. 246–268, 2015.
- [66] M. Maniadakis and P. Trahanias, "Experiencing and processing time with neural networks," in *Proc. 4th Int. Conf. on Advanced Cogn. Tech. and App.*, 2012.
- [67] M. Maniadakis and P. Trahanias, "Is time the next big thing in robot cognition?,"