

Deneyel Hayvan Çalışmalarında Robot Kullanımı

Oğuzcan Nas¹, Güneş Ünal²

Nas, O. ve Ünal, G. (2021). Deneyel Hayvan Çalışmalarında Robot Kullanımı. *Nesne*, 9(19), 190-203. DOI: 10.7816/nesne-09-19-14

Anahtar kelimeler

Deneyel psikoloji,
davranışsal
sinirbilim, hayvan
modelleri, robotik

Keywords

Experimental
psychology,
behavioral
neuroscience,
animal models,
robotics

Öz

Deneyel psikoloji ve davranışsal sinirbilimde robot kullanımı gittikçe yaygınlaşmakta ve hayvan davranış deneylerinin temel yöntemlerinden birine dönüşmektedir. Robotların deney hayvanlarıyla beraber kullanımı, hayvanlara belirgin çevresel uyarınları seçici bir biçimde aktarmak, farklı ve görece zor davranışlar öğretmek ve hayvanların grup davranışını manipüle etmek için önemli avantajlar sağlamaktadır. Robotlar ve hayvanların davranış düzeneklerinde beraber kullanımının yanı sıra, çeşitli robotik sistemlerin deney hayvanlarına entegre edilmesiyle biyohibrit canlılar oluşturulmaktadır. Hayvanların dışarıdan verilen komutlara uyarak robotik bir biçimde yönetilmesini sağlayan yöntemler ile robotların hayvanlar tarafından yönetilmesini sağlayan uygulamalar, deneyel hayvan çalışmalarına yeni yöntemler kazandırmaktadır. Bununla birlikte, hayvan davranışını ve sinir sisteminin çalışma ilkelerini temel alarak geliştirilen yapay zekâ ve robotik öğrenme modelleri ortaya çıkmakta ve bu teknolojiler hayvan deneylerinde kullanılmaktadır. Bu derleme, deneyel psikoloji ve davranışsal sinirbilimde robotlar ve deney hayvanlarının birlikte kullanımını üç ana başlık altında incelemektedir. Deney hayvanlarının ve robotların etkileşimine dayanan davranış testleri (1) ele alınmakta, robotik sistemlerin hayvanlara entegre edilmesiyle oluşturulan biyohibrit canlılar (2) ve biyoloji temelli robotik sistemler (3) açıklanmaktadır. Ortaya çıkan bu yenilikçi uygulamaların deneyel hayvan çalışmalarına sunduğu teorik ve teknik katkılar değerlendirilmektedir.

The Use of Robots in Experimental Animal Studies

Abstract

The use of robots in experimental psychology and behavioral neuroscience is emerging as a fundamental method in behavioral experiments using animal models. Utilizing robots in animal experiments provides a substantial advantage for delivering specific stimuli to animals in a selective manner, teaching them different and relatively difficult behaviors, and manipulating group activity. In addition to using individual robots and animals together in behavioral paradigms, biohybrid organisms are created by integrating certain robotic systems with animals. Enabling animals to be controlled by external inputs like robots and enabling robots to be controlled by animals lead to the development of new experimental methods in behavioral animal studies. In addition, artificial intelligence and robotic learning models utilize animal behavior and basic working principles of the nervous system, and the emerging technology can be used in behavioral testing. This review investigates the use of robots and animals in experimental psychology and behavioral neuroscience under three headings. Behavioral tasks that contain animal-robot interactions (1) are discussed, together with biohybrid organisms created by integrating robots into the animals (2) and biology-inspired robotic systems (3). The theoretical and technical contributions of this novel technology and the resulting applications are evaluated.

Makale Bilgisi

Geliş tarihi: 25 Ekim 2020
Düzeltilme tarihi: 1 Şubat 2021
Kabul tarihi: 13 Şubat 2021

Yazar Notu: Bu çalışma Boğaziçi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (proje kodu: 20B07P1, yürütücü: Dr. Öğr. Üyesi Güneş Ünal) tarafından desteklenmiştir.

DOI: 10.7816/nesne-09-19-14

¹ Yüksek Lisans Öğrencisi, Boğaziçi Üniversitesi Bilişsel Bilim Programı, oguzcana(at)gmail.com, ORCID: 0000-0002-4478-4260

² Dr. Öğr. Üyesi, Boğaziçi Üniversitesi Psikoloji Bölümü, gunes.unal(at)boun.edu.tr, ORCID: 0000-0003-3013-0271

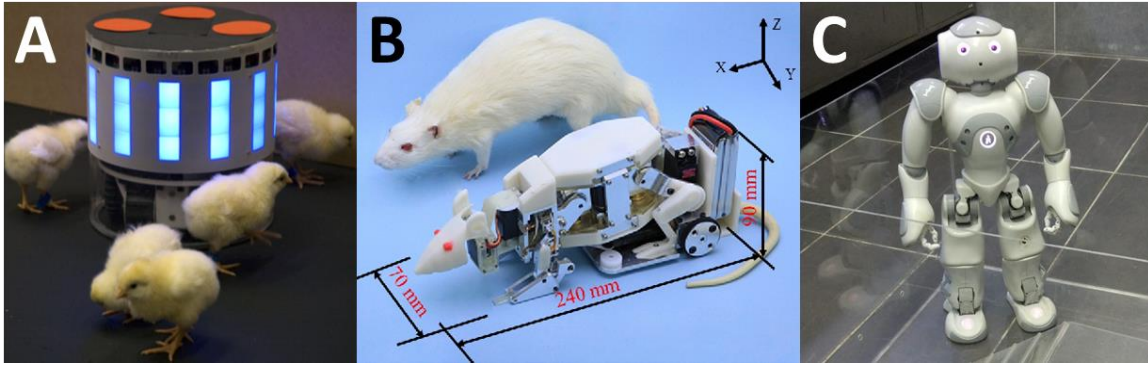
Günümüzde robotlar birçok temel bilim alanında kullanılmakta, mevcut bilimsel yöntemleri kolaylaştırmakta ve yeni yöntemlerin geliştirilmesini mümkün kılmaktadır. Robotların deney hayvanlarıyla beraber kullanımı, deneysel psikoloji ve davranışsal sinirbilimde gittikçe yaygınlaşmaktadır (Romano, Donati, Benelli ve Stefanini, 2019). Bu etkileşim içinde robotik teknoloji de bu alanlardan beslenerek gelişmektedir (Hassabis, Kumaran, Summerfield ve Botvinick, 2017; Romano ve ark., 2019). Robotlar davranışsal deneylere daha önce elde edilemeyen bir tutarlılık getirmekte, böylece veri toplama ve değerlendirme süreçlerinin nesnellliğini belirgin biçimde arttırmaktadır. Ayrıca, istenen davranışları tutarlı şekilde tekrar edebilen yeni nesil robotlar, deneysel süreçleri otomatikleştirmekte ve kolaylaştırmaktadır (Frohnwieser, Murray, Pike ve Wilkinson, 2016).

Robotlar, etkileşime geçtiği deney hayvanının boyutunda ve şeklinde imal edilebilmekte, özel amaçlar için programlanabilmekte ve deney hayvanlarının arasında o türün bir üyesi gibi algılanabilmektedir (Frohnwieser ve ark., 2016). Deneysel hayvan çalışmalarında robot kullanımı, robotların davranış yönlendirmesi için deney düzeneklerine dâhil edilmesiyle sınırlı değildir. Hayvanlar ve robotik sistemler birleştirilerek biyohibrit organizmalar oluşturulmakta, böylece deney hayvanı kendisine entegre edilen elektronik sistemlerle bir robot gibi uzaktan kumanda edilebilmektedir (Romano ve ark., 2019). Nöronal çıktılar yapay zekâ ile desteklenmekte (Brown ve Brown, 2017), duyu organları sensör olarak robotlara eklenmekte (Kuwana, Nagasawa, Shimoyama ve Kanzaki, 1999) ve hayvanlar tarafından yönetilen robotlar üretilmektedir (Ando ve Kanzaki, 2017). Bu derleme, deneysel psikoloji ve sinirbilimde robotlar ve deney hayvanlarının birlikte kullanımını inceleyecektir. Bu iki alanda gittikçe yaygınlaşan robot kullanımı, temel hayvan-robot etkileşim paradigmaları (1), biyohibrit canlılar (2) ve biyolojiden ilham alan robotik sistemler (3) olmak üzere üç ana başlık altında değerlendirilecektir.

Hayvan-Robot Etkileşim Paradigmaları

Deneysel çalışmalarda hayvanlarla etkileşime geçen robotik sistemlerin öncülü mekanik sistemlerdir. Makinelerin deney hayvanlarının mevcut davranışlarını değiştirmek veya onlara yeni davranışlar öğretmek için kullanımı, psikolojideki davranışçılık akımı ile ortaya çıkmıştır (bkz. Guthrie ve Horton, 1946; Skinner, 1959; Thorndike, 1913). Meşhur edimsel koşullanma deneylerinde B. F. Skinner (1932, 1948), sıçanlara ve güvercinlere ödül almak için bir tuşa basmayı veya belirli bir sinyalden kaçınmayı makineler yardımıyla öğretmiştir. Makineler basit işleri tekrar tekrar yapabilen, aldığı enerjiyi istenilen yöne iletebilen ya da başka bir enerji formuna dönüştürebilen, genellikle sabit aletlerdir. Robotlar ise görece karmaşık işleri yapabilen, hareket edebilen ve etrafını algılayabilen aygıtlardır.

Deneysel hayvan çalışmalarında robot kullanımı gittikçe yaygınlaşmakta ve robotik sistemler, sabit makinelerin yerini almaktadır (Romano ve ark., 2019). Canlıların türdeş (conspecific) sanacağı robotlar üretilmekte, deney hayvanları bu robotlara karşı kendi türlerine sergiledikleri sosyal davranışları gösterebilmektedir (Halloy ve ark., 2007; Mitri, Wischmann, Floreano ve Keller, 2013). Bununla birlikte, deneylerde kullanılan robotlar etkileşim içinde bulunduğu canlıya benzemeyebilir. Belirli çalışmalarda deney hayvanından tamamen farklı bir biçimde, örneğin antropomorfik özellikler barındıran robotlar kullanılmakta veya robot deney hayvanına sadece boyut açısından benzemektedir (Quinn ve ark., 2018) (bkz. Şekil 1).



Şekil 1. Deneysel hayvan çalışmalarında kullanılan farklı tip robotlar. Hayvan-robot etkileşiminde deney hayvanına benzemeyen otonom robotlar (A: Cıvcıvlarla etkileşime geçen PoulBot robotu; Gribovskiy, Halloy, Deneubourg, Bleuler ve Mondada, 2010), deney hayvanına benzeyen biyomimetik robotlar (B: Sıçan benzeri bir robot; Shi, Ishii, Kinoshita, Takanishi, ve ark., 2013) ve insansı robotlar (C: Antropomorfik Nao robotu; Boğaziçi Üniversitesi Davranışsal Sinirbilim Laboratuvarı, 2020) kullanılabilir.

Robotun deney hayvanına benzemesi ve o canlı tarafından türdeş olarak algılanması istendiğinde biyomimikriye başvurulmakta ve robot hedef canlıya bir veya birkaç yönden benzer biçimde üretilmektedir. Canlıların kendi türlerini algılamakta kullandıkları yöntemler farklı olduğu için (Hepper, 1986), robotlar bazen görsel olarak (bkz. Patricelli, Uy, Walsh ve Borgia, 2002), bazen feromonlarla (bkz. Halloy ve ark., 2007), bazen hareket şekli ile (bkz. Göth ve Evans, 2004), bazen de deney hayvanlarının derisi ve diğer dokuları kullanılarak (bkz. Butler ve Fernández-Juricic, 2014) istenen türe benzetilmektedir.

Robotların davranış deneylerinde kullanımının temel nedenlerinden biri, klasik yöntemler ile mümkün olmayan öğrenme süreçlerini gerçekleştirmektir. Gianelli ve arkadaşlarının (2018) sıçanlarda yaptığı edimsel koşullanma çalışması buna güzel bir örnektir. Deney hayvanlarını fiziksel olarak kısıtlamadan belirli bir hızda (örneğin 10 m/dk.) yürümeye koşullamak, önceki çalışmalarda mümkün olmamıştır. Bu konuda yapılan ilk çalışmalar deneycinin kemirgeni eliyle tutup hareket ettirmesi gibi yöntemleri uygulamıştır (Foster, Castro ve McNaughton, 1989). Yakın zamanda yapılan çalışmalarda ise, hızı bilgisayarla kontrol edilen koşu bantları ve sıçanlara uygun olarak üretilmiş sanal gerçeklik gözlükleri kullanılmış; fakat yine de deney hayvanının sabit koşu bandı dışında istenilen hızda hareket etmesi sağlanamamıştır (Aghajan ve ark., 2015). Hayvanın hareket hızını herhangi bir fiziksel kısıtlama kullanmadan kontrol etmek, ancak Gianelli ve arkadaşlarının (2018) geliştirdiği robotik yöntem ile mümkün olmuştur. Bu çalışmada sıçanlar top şeklinde hareketli bir robotu takip etmeye koşullanmış ve bu sayede hem istenen hızda hem de istenen bir güzergâhta hareket etmeleri sağlanmıştır.

Robotların deney hayvanına belirli bir davranışı öğretmek için kullanılması, tek bir duyu sistemi ve motor etkinliğe dayanan edimsel koşullanma paradigmaları ile sınırlı değildir. Hedeflenen davranışların robotlar aracılığıyla hayvanlara aktarılması, sosyal öğrenme ile de gerçekleşebilir (Galef ve Laland, 2005). Yukarıda değinilen çalışmada (Gianelli ve ark., 2018) sıçanlar, karmaşık bir düzeneği (labirenti) kendi başlarına öğrenemezken robotun rehberliğinde öğrenebilmiş ve sonra bu bilgileri robotun yokluğunda da kullanabilmiştir.

Sosyal öğrenme ve grup davranışıyla ilişkili biçimde, hayvanlar arasındaki av-avcı ilişkilerini inceleyen davranışsal deneylerde de robotlardan faydalanılmaktadır. Bu çalışmalarda av konumundaki

hayvanı avcıyla baş başa bırakmak etik sorunlar taşımaktadır. Ayrıca, av konumundaki hayvanın avcı karşısında verdiği içgüdüsel tepkiler deneysel uygulamayı aksatabilmektedir. Robotik sistemler bu sorunların üstesinden gelen kullanışlı modeller oluşturmaktadır (Frohnwieser ve ark., 2016; Henderson, Nicol, Lines, White ve Wathes, 2001; Ladu ve ark., 2015; Romano ve ark., 2019; Rundus, Owings, Joshi, Chinn ve Giannini, 2007). Robot kullanımı sayesinde av konumundaki hayvanın savunma davranışlarının avcı üstündeki yıldırıcı etkisi de araştırılabilmiştir. Rundus ve arkadaşları (2007) çalışmalarında bir çeşit yer sincabı olan Kaliforniya gelengilerinin savunma davranışlarını robot kullanarak incelemiştir. Gelengiler doğal ortamlarında yılanlarla birlikte yaşamakta ve yavru gelengiler bu yılanlara av olabilmektedir. Yetişkin gelengiler yılanları yerden kum sıçratma ve kuyruklarını hızlıca sallama gibi etkin savunma davranışlarıyla caydırmaya çalışmaktadır. Bu çalışmada Kaliforniya gelengilerinin, kızılötesini algılayabilen yılanlara karşı yaptıkları savunma hareketlerine, kızılötesi bir uyararı ekledikleri anlaşılmıştır. Gelengiler kızılötesini algılamayan yılan türlerine karşı ise herhangi bir kızılötesi uyararı kullanmamaktadır. Bu seçici türe özgü (species-specific) davranışın etkinliğini sınamak için robot bir gelengi üreten ekip, avcı yılanları robot gelengisiyle karşı karşıya getirmiştir. Robot gelenginin savunma davranışı sırasında kızılötesi ışın yapmasının, kızılötesine duyarlı yılanları caydırmakta daha etkili olduğu gözlemlenmiştir (Rundus ve ark., 2007). Böylece ilk defa bir canlının savunma için kızılötesi ışık kullandığı anlaşılmıştır. Bu keşif robot kullanımı sayesinde mümkün olmuştur.

Birçok hayvan gözlemsel öğrenme, yani türdeş canlıların davranışlarını izleyerek bilgi edinme yetisine sahiptir (Heyes, 1994). Bu bilgidir hareketle, biyomimetik robotların bir türün arasına karışıp onlara belirli davranışları öğretmesi mümkün olabilmektedir. Takanishi ve arkadaşları (1998) sıçan görünümünde bir robot üretmiş ve sıçanların bu robotla tahmin edilebilir şekillerde etkileşime geçtiğini gözlemiştir. Sonraki yıllarda sıçanlara ödül almak için bir tuşa basmak gibi basit davranışları öğretebilen sıçan benzeri robotlar yapılmıştır (Laschi ve ark., 2006; Shi, Ishii, Kinoshita, Konno, ve ark., 2013; Shi, Ishii, Kinoshita, Takanishi, ve ark., 2013). Görece yeni çalışmalarda ise kemirgenlerin kendi başlarına öğrenemedikleri davranışları robotlar sayesinde öğrenebildikleri gözlemlenmiştir. Örneğin sıçanlar, kendi başlarına çıkış noktasını bulamadıkları bir labirentten bir robotun rehberliği ile kaçabilmektedir (Gianelli ve ark., 2018). Ayrıca, kemirgenler kendi başlarına öğrenemedikleri belirli edimsel koşulları robotların yardımıyla öğrenebilmekte ve ancak bu sayede ödüle erişebilmektedir (Shi ve ark., 2015; Shi, Ishii, Kinoshita, Konno ve ark., 2013). Robotların yardımıyla öğrenme sadece kemirgenlerle sınırlanmamıştır. Bayağı sığırcıklar (*sturnus vulgaris*) üzerinde yapılan bir çalışmada bu kuşların, robotları izleyerek sosyal öğrenmenin temel bileşenlerinden biri olan dikkat yöneltme davranışını gösterdikleri anlaşılmıştır (Frohnwieser ve ark., 2016).

Robotlar, hayvanların birbirleri arasındaki etkileşimleri daha iyi anlamak için de kullanılmaktadır. Kemirgenlerin türdeşlerine yardım etme davranışının incelendiği deneylerde, sıçanların dar bir kafese kapatılan başka sıçanları kurtarma eğiliminde oldukları bilinmektedir (Bartal, Decety ve Mason, 2011). Ancak bu davranışın yardım etme amacıyla mı yoksa başka bir motivasyonla mı yapıldığı tartışmalıdır (Hachiga ve ark., 2018). Quinn ve arkadaşları farklı robotlar kullandıkları bir çalışmada (2018) sıçanlar, robotları hapsedikleri kafeslerden kurtarmaktadır. İlginç biçimde bu sıçanlar, daha önce kendilerine yardım etmiş robotlara öncelik vermiş, bu robotları kendilerine yardım etmemiş robotlara kıyasla daha fazla kurtarmışlardır. Araştırmanın yazarları bu sonucun sıçanların karşılıklı yardım duygularıyla davrandığına bir kanıt oluşturduğunu savunmaktadır (Quinn ve ark., 2018).

Kuşlarda ise Patricelli ve arkadaşlarının (2002) saten çardak kuşlarının çiftleşme davranışı üzerindeki araştırması örnek gösterilebilir. Dişi çardak kuşu şeklinde bir robot, erkek çardak kuşlarıyla

etkileşime sokularak erkek kuşların dişilerin ilgisini çekmek için çıkarttığı çiftleşme çağrılarını incelenmiştir. Önceki görüş erkek kuşların çiftleşme çağrılarını her zaman gerçekleştirebildikleri en yüksek seviyede yaptıkları yönündeyken, bu çalışma sonucunda çağrılarının şiddetinin dişi kuşların tepkilerine göre ayarlandığı anlaşılmıştır (Patricelli ve ark., 2002).

Robotlar, canlı sürülerinin arasına girip sürünün davranışını yönlendirmek için de kullanılmıştır. Belirli canlı türlerinde, özellikle kuşlarda, doğum sonrası basımlama olarak adlandırılan bir olay gerçekleşir. Yumurtadan çıktıktan sonra gördükleri ilk hareketli nesne ile bağ kuran yavrular, daha sonra o nesneyi takip eder ve yokluğunda stres belirtileri gösterir (Lorenz, 1937). Yumurtadan çıktıktan hemen sonra robotların yanına yerleştirilen yavrularda basımlamanın robotlarla gerçekleştiği, Japon bıldırcınlarında (de Margerie ve ark., 2013) ve kümes tavuklarında (Jolly ve ark., 2016) gösterilmiştir. Ayrıca bu yavru kuşlar, robotun yokluğunda stres davranışları sergilemiştir. Davranış deneylerinde kullanılan bu yöntemin tavukçuluk gibi endüstrilere fayda sağlama potansiyeli bulunmaktadır.

Kuşlarla ilgili bir başka çalışmada ise kuş sürülerinin havaalanlarına yaklaşmasını önleyen biyomimetik bir robot geliştirilmiştir (Folkertsma, Straatman, Nijenhuis, Venner ve Stramigioli, 2017). Pist bölgesindeki kuş sürüleri uçuş güvenliği açısından tehlike oluşturmakta ve bu hayvanları uzaklaştırmak için kullanılan klasik yöntemler genellikle kuşlara zarar vermektedir. Buna alternatif olarak geliştirilen robotik yöntemlerde, görünüm ve hareket açısından uzaklaştırılmak istenen kuş türünün avcısı olan türe benzeyen robotlar kullanılmaktadır. Henderson ve arkadaşları (2001) ise aynı yöntemi ördekler üzerinde uygulamış ve geliştirdikleri robotla ördek sürülerini tehlikeli bölgelerden uzaklaştırmıştır. Aynı yöntem başka hayvanlar üzerinde de uygulanmaktadır. Biyomimetik robotlar hamam böceklerinin yuva seçimini değiştirebilmekte (Halloy ve ark., 2007), balıklarda ise sürünün arasına karışıp lider seçimini etkilemektedir (Faria ve ark., 2010).

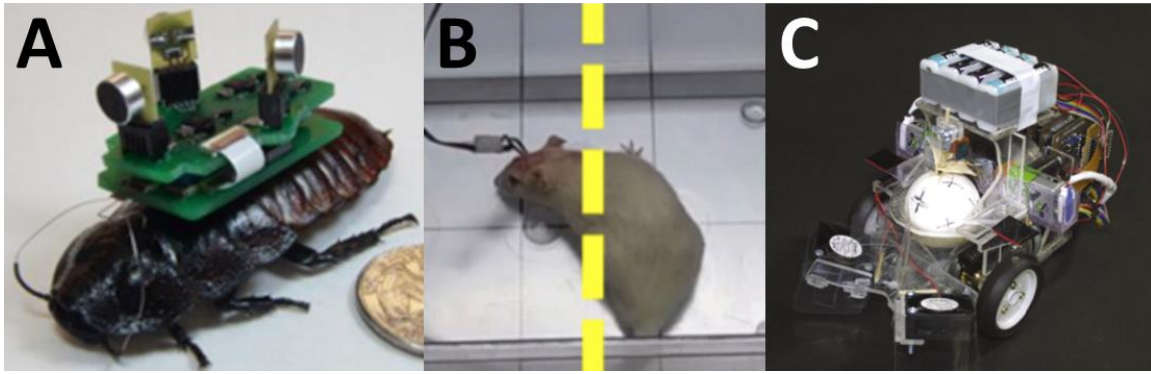
Biyohibrit Canlılar

DeneySEL çalışmalarda hayvanlarla etkileşime geçen robotik sistemlerin öncülü mekanik sistemlerdir. Makinelerin deney hayvanlarının mevcut davranışlarını değiştirmek veya onlara yeni davranışlar öğretmek için kullanımı, psikolojideki

Çeşitli hayvanların uzaktan kontrol edilebilmesi sadece yeni dENEYSEL uygulamalar geliştirmek için kullanılmamaktadır. Bu çalışmalardan elde edilen bulguların ve oluşturulan robotik kontrol mekanizmalarının, afet bölgelerinde arama kurtarma faaliyetlerinde ve güvenlik ile ilgili alanlarda kullanıma potansiyeli vardır. Motor hareketleri uzaktan kontrol etmeye yarayan aparatların hayvanlara yerleştirilmesiyle ortaya çıkan biyohibrit canlılar, kendi başına bir teknoloji sahası oluşturmaktadır (Diorio ve Mavoori, 2003). Bu yenilikçi teknolojinin temelleri beyin yapılarının elektriksel uyarımı ile atılmıştır. Bu konudaki ilk çalışma 19. yüzyılın sonlarında icra edilmiş, bir köpeğin beynine elektrik verildiğinde vücudundaki belirli kasların hareket ettiği keşfedilmiştir (Fritsch ve Hitzig, 1870). Elektriksel uyarım yöntemi günümüzde Tourette sendromu (Schrock ve ark., 2015) ve Parkinson hastalığının tedavisinde (Benabid, 2003) kullanılmakta, belirgin basal ganglia çekirdeklerine elektrik verilerek semptomlarda iyileşme sağlanması hedeflenmektedir. Bir başka öncü çalışmada ise kediler kullanılmış, farklı hipotalamik çekirdeklere verilen elektrik akımları ile hayvanların çeşitli saldırgan davranışlar göstermeleri sağlanmıştır (Flynn, 1969; Levison ve Flynn, 1965).

Sinirbilime yön veren klasik elektrik uyarımı deneyleri, günümüz teknolojisi ile birlikte yüksek kontrol sağlayan bir biçim kazanmıştır. Elektriksel beyin uyarımı için hayvanın kafatasına yerleştirilen basit elektrotlar, yüksek zamansal çözünürlükte kontrol sağlayan aparatlara dönüşmüş ve farklı tip biyohibrit

canlılar oluşturulmuştur (bkz. Şekil 2). Talwar ve arkadaşları (2002) öncül bir sistem geliştirmiş ve beynin farklı bölgelerine iletebildikleri hassas elektriksel sinyaller ile bir sıçanın istenen yönde hareket etmesini sağlamıştır. Çalışmada sıçanın sırtına takılan bir aparat aracılığıyla, bıyıklardan bilgi alan birincil somatosensori korteks (SI) ve beynin ödül sisteminde yer alan medial ön beyin demeti hedeflenmiştir. Hayvan SI bölgesine verilen uyarımlar ile istenen davranışı yaptığıında medial ön beyin demeti de uyarılmış ve böylece hayvana sanal ödüller verilmiştir. Bu yöntem ile bir süre eğitilen bir sıçanı, elektriksel uyarımlar ile uzaktan kontrol etmek mümkün olmaktadır. Sonraki çalışmalar bu uygulamayı daha güçlü ve hızlı bir hale getirmiştir. Beynin farklı yerlerine yerleştirilen elektrotlar aracılığıyla hayvana sanal cezalar verilmesi (Huai, Yang, Wang ve Su, 2009) veya nigrostriatal yolağın uyarımı (Koo ve ark., 2017) ile sıçanların hedeflenen hareketleri herhangi bir eğitime gerek kalmadan yapması sağlanmıştır.



Şekil 2. Deneysel hayvan çalışmalarında kullanılan farklı tip biyohibrit sistemler. Biyohibrit uygulamalar otonom olarak kontrol edilen canlıları (A: Antenlerine bağlı elektrotlar ve üzerinde bulunan sistem ile ortamdaki belirli bir sesi tespit edip ses kaynağına ulaşabilen bir hamam böceği; Latif ve ark., 2016), uzaktan kumanda edilen canlıları (B: Nigrostriatal yolak uyarımı ile uzaktan yönlendirilebilen bir sıçan; Koo ve ark., 2017) veya bir hayvan tarafından kontrol edilen robotları (C: İçinde belirli bir kokuyu algılayan ve kendi hareketleriyle robotu koku kaynağına ulaştırabilen bir ipek böceği taşıyan robot; Ando ve Kanzaki, 2017) kapsar.

Görece yeni çalışmalarda ise, hayvanların insan müdahalesi olmadan, ortamın özelliklerine göre otonom bir şekilde kontrol edilmeleri mümkün kılınmıştır. Bu deneylerden birinde bir sıçanın sırtına takılan kamera ile uzaktaki bir bilgisayara veri aktarılmaktadır (Wang ve Qiao, 2017). Yapay zekâ kullanan bilgisayar, görülen nesnelere algılayıp sıçanın beynine bağlı elektrotları etkinleştirerek hayvanı kontrol etmektedir. Bu sayede, örneğin kamera tarafından sola dön işareti görüldüğünde sıçan sola döndürülmekte veya bir hedef nesne sıçan tarafından bulunduğu hayvana belirli bir hareket yaptırılmaktadır (Wang ve Qiao, 2017). Bir başka çalışmada ise yine elektriksel uyarımlar ile sıçanların istenen yöne hareket etmeleri sağlanmış; daha sonra bu sistemin kontrolü uzak bir bilgisayardaki labirent çözme yazılımına devredilmiştir (Yu ve ark., 2016). Yazılım, labirente konulan sıçanların çıkışı ararken hata yaptığını fark edip müdahale edebilmekte, beyine gerekli sinyalleri vererek hayvanın doğru yöne gitmesini sağlamaktadır. Bu yöntem ile eğitilen sıçanlar labirentin çıkışını daha hızlı bulmuştur (Yu ve ark., 2016). Aynı yöntem kemirgen modellerinin dışında hamam böceklerinde uygulanmış ve çok daha küçük olan bu canlılar da uzaktan kontrol edilebilmiştir (Dirafzoon, Bozkurt ve Lobaton, 2017; Latif, Whitmire, Novak ve Bozkurt, 2016).

Biyohibrit sistemler aracılığıyla ortaya çıkan hayvan-robot etkileşimi çift yönlü olabilmektedir. Hayvanlar belirli beyin yapılarını hedefleyen elektriksel uyarım aparatları aracılığıyla robotize edilirken,

robotların hayvanlar tarafından kontrol edilmesi de sağlanmıştır. Bu tip çalışmalarda canlının hareketlerinden, duyu organlarından ya da doğrudan sinir sisteminden alınan veriler robota aktarılmakta ve böylece robotun istenen görevleri yapması amaçlanmaktadır (Alapan ve ark., 2019; Romano ve ark., 2019; Steager, Wong, Mishra, Weiss ve Kumar, 2014). Bu hedef doğrultusunda yapay ve biyolojik sensörler bir arada kullanılabilir. Örneğin GPS (Küresel Konumlandırma Sistemi), rüzgâr ölçer ver canlı güvelerin antenlerinden alınan sinyaller beraber kullanılarak belirli bir koku kaynağını tespit etmek mümkün olmuştur (Myrick ve Baker, 2011). Benzer bir çalışmada Ando ve Kanzaki'nin (2017) geliştirdiği robot, koku kaynaklarına kendi içine yerleştirilen bir ipek böceğinin hareketlerini kullanarak ulaşmaktadır. Aynı teknoloji anlık tepki gerektiren yer-yön bulma (navigasyon) için de uygulanmıştır. Bu çalışmada robot, içine yerleştirilen bir sineğin (*calliphora vicina*) gözündeki sinir hücrelerinden aldığı sinyalleri işleyerek çevresindeki nesnelere algılayabilmiş ve çarpışmadan kaçınmıştır (Huang, Wei ve Krapp, 2019).

Biyolojik sensörlerin robotlarca kullanılması canlı hayvanlarla (*in vivo*) sınırlı kalmayıp, doku düzeyinde de (*in vitro*) uygulanmıştır. Misawa ve arkadaşlarının (2019) yaptığı çalışmada bir sivrisinekten alınan ve belirli kokulara duyarlı reseptörlerin bulunduğu zar dokusu, bir çip üzerine yerleştirilmiş ve buradan elde edilen ölçümlerle robot, reseptörü etkileyen kokunun kaynağını bulabilmiştir. Bir başka deneyde ise genetiği değiştirilerek mor ötesi ışığa duyarlı hale getirilmiş bakteriler, mikron ölçeğindeki robotlara entegre edilmiş ve robotların buldukları ortamla ilgili bilgi kaydedebilmeleri sağlanmıştır (Steager ve ark., 2014).

Biyolojiden İlham Alan Robotik Sistemler

Sinir sisteminin temel özellikleri ve çalışma ilkeleri, yapay zekâ ve robotik çalışmalarının en önemli ilham kaynaklarından (Beer, Quinn, Chiel ve Ritzmann, 1997; Hassabis ve ark., 2017). Günümüzde en çok kullanılan yapay zekâ modellerinden biri olan yapay sinir ağları, temel çalışma ilkeleri bakımından biyolojik sinir ağlarını taklit etmektedir (Hassabis ve ark., 2017). Yapay sinir ağları sadece biyolojik beyinlerin genel özelliklerini temel almaz, belirgin beyin yapılarını da modelleyebilir (Hassabis ve ark., 2017). Bunlardan en yaygını hipokampusdur. Hipokampus, mekânsal yer-yön bulma ve açık bellek oluşumunda, yani bilinçli bir biçimde geri çağırılıp ifade edilebilen bellek türünde başat rol oynar (Ünal, 2019). Bu bellek türünde gün içinde yaşanan olaylar, sakin bir biçimde dinlenirken veya uyurken hipokampus tarafından “tekrar oynatılarak” konsolide edilir ve uzun süreli belleğe aktarılır (Buzsáki, 1989). Bu “tekrar oynatma” çevresel olayları kodlayan ve belleğe dönüştüren nöronal ağın etkinleş(tiril)mesi anlamına gelmektedir. Hipokampal tekrar oynatma deneysel yöntemlerle bozulduğunda öğrenme süreci zarar görmekte ve bellek sorunları ortaya çıkmaktadır (Buzsaki ve Tingley, 2018; Mnih ve ark., 2015; O’Neill, Pleydell-Bouverie, Dupret ve Csicsvari, 2010). Bu bilgilerden hareketle geliştirilen bir öğrenme modelinde, yapay sinir ağlarının hipokampusun çalışma ilkelerini taklit ederek öğrenilen olayları tekrar oynatması sağlanmış ve böylece modeldeki yapay öznenin öğrenme performansı artırılmıştır (Mnih ve ark., 2015). Bu modelin kullanıldığı bir başka çalışmada görece önemli olaylar önemsiz olaylara göre daha sık tekrar oynatılmış ve yapay öznenin bellek performansı insanlardakine benzer bir biçimde artmıştır (Schaul, Quan, Antonoglou ve Silver, 2016). Benzer hipokampal yapay zekâ uygulamaları ile robotik teknolojinin önemli konularından biri olan eşzamanlı konumlandırma ve haritalandırma sorununa yeni çözümler ortaya konmuştur (Milford, Wyeth ve Prasser, 2004; Milford, Jacobson, Chen ve Wyeth, 2016). Eşzamanlı konumlandırma ve haritalandırma, robotun yeni bir çevreyi keşfederek haritasını çıkarırken kendi konumu da takip edebilmesini ifade eder. İnsanlarda hipokampus tarafından yönetilen bu haritalama ve kendini harita içinde konumlandırma süreci (Ünal, 2019), söz konusu model ile robotik sistemlere aktarılmıştır. Bu

çalışmalarda robotlar hem tanımadıkları bir ortamın haritasını çıkarabilmiş hem de bu haritada kendi konumlarını anlık olarak kodlayabilmiştir (Milford ve ark., 2004; Milford ve ark., 2016).

Nörobijolojiden ilham alarak geliştirilen ve robotik sistemlerin kontrolünde kullanılan bir başka yapay zekâ uygulaması ise pekiştirmeli öğrenme paradigmasıdır. Omurgalı ve omurgasız birçok canlı, çevresel uyaranları ve kendi davranışlarını belirli bir ödül veya ceza ile ilişkilendirip davranış değişikliği gösterebilmektedir. Bu yetiyi taklit eden yapay zekâ uygulamaları edimsel koşullanmanın temel öğelerini kullanmaktadır (Shah, 2012). Bu sayede robotlar, Skinner'ın güvercinleri gibi (Skinner, 1948), çevreyle etkileşime girerek kendi davranışları ile aldıkları ödüller arasındaki bağlantıyı öğrenebilmekte ve bu bilgileri kullanarak daha sık veya daha fazla ödül almak için kendi davranışlarını değiştirebilmektedir (Staddon ve Cerutti, 2003).

Omurgalı beyinde edimsel koşullanma (Balleine, Liljeholm ve Ostlund, 2009), motor öğrenme (Unal ve Canbeyli, 2019) ve ödül davranışı (Sesack ve Grace, 2010) basal ganglia sisteminin oluşturduğu geniş çaplı nöronal devrelerce düzenlenir. Bu sistemin temel nörokimyasalı, insan beyindeki en yaygın katekolomin olan dopamindir (Ikemoto, Yang ve Tan, 2015). Ödül tahmini hesaplamasında ve bu tahminin gerçeklikle kıyasının yapıp hata miktarının bulunmasında dorsal striatal dopaminerjik (dopamin salgılayan) yolak rol oynar (Oyama, Hernádi, Iijima ve Tsutsui, 2010). Beyindeki nöronal ödül ağının, ödül ile ilgili tek bir skaler değer hesaplayıp, gerçekte aldığı sonucu o değerle kıyasladığı ve ödül algısı ve davranışını bu şekilde yönlendirdiği düşünülmektedir (Dabney ve ark., 2020; Glimcher, 2011). Yapay zekâ çalışmaları bu biyolojik modelden farklılaşmış, birden çok ödül hesaplayıcısının farklı ödül miktarlarıyla ilgili tahminler yaptığı ve karmaşık ödül ihtimal dağılımlarını hesaplayabildiği pekiştirmeli öğrenme sistemleri geliştirilmiştir (Morimura, Sugiyama, Kashima, Hachiya ve Tanaka, 2010). Bu öğrenme sistemi tek bir ödül değişkenine kıyasla daha iyi performans göstermektedir (Dabney, Rowland, Bellemare ve Munos, 2017). Buradan yola çıkarak, hayvanlarda da ödül tahmini hesaplamasının tek bir skaler değer yerine bu şekilde yapılabildiği gösterilmiştir (Dabney ve ark., 2020). Bu deneyde farelere farklı ödül alma ihtimallerini işaret eden sinyaller öğretilmiş ve lateral ventral tegmental bölgedeki dopaminerjik hücrelerden elektrofizyolojik kayıt alınmıştır. Bu kayıtlarda dopaminerjik hücrelerin aynı ödüle birbirinden farklı şekilde tepki verdiği anlaşılmıştır. Bazı nöronların daha iyimser, bazı nöronların daha kötümser ödül beklentilerini kodladığı görülmüştür. Bu bakımdan beyindeki ödül dağılım beklentisinin, açıklanan yapay zekâ modelindeki gibi birden çok ödül hesaplayıcı ile oluştuğu sonucuna varılmıştır (Dabney ve ark., 2020; Eshel ve ark., 2015; Eshel, Tian, Bukwich ve Uchida, 2016). Pekiştirmeli öğrenme paradigmasındaki bu gelişmeler robotik teknolojide de yeni yöntemlerin önünü açmakta, gerçek dünyadaki ihtimal dağılımlarını öğrenerek daha iyi adapte olan robotik sistemler geliştirilmektedir (bkz. Min, Kim ve Huh, 2019; Tan, Lee, Chng, Lim ve Chui, 2020).

Sonuç

Bu derlemede incelediğimiz hayvan-robot etkileşim paradigmaları, biyohibrit canlılar ve biyoloji temelli robotik sistemler, yeni nesil deneysel hayvan çalışmalarının temel yöntemlerini oluşturmaktadır. Deneysel psikoloji ve davranışsal sinirbilim alanlarında robotlar ve deney hayvanlarının birlikte kullanımı, hem hayvan deneylerine teknik ve teorik yenilikler getirmekte hem de robotik teknolojiye katkı sağlamaktadır. Halen birçok hayvan-robot etkileşim çalışmasında, robotların davranışları tamamen otomatize bir şekilde veya basit bir algoritmayla oluşturulmaktadır (bkz. Ishii ve ark., 2004; Shi ve ark., 2015). Ancak son kısımda değindiğimiz biçimde, yapay zekânın robotik sistemler için kullanımı gittikçe öne çıkmaktadır. Bu yeni yapay zekâ algoritmalarıyla robotlar, deney düzeneği içinde daha çeşitli ve her zaman

tahmin edilemez davranışlar gösterebilmektedir. Robotların davranışsal repertuarının geliştirilmesi, robotla etkileşim içinde bulunan deney hayvanlarının da daha geniş bir yelpazede davranış örüntüleri göstermesini sağlayacaktır. Hayvanlarda ortaya çıkarılan bu davranışsal çeşitlilik, yine yapay zekâ ve makine öğrenmesi yöntemleri ile tespit edilmektedir. Yapay zekâ yöntemleriyle incelenen kamera görüntülerinden, deney hayvanının mevcut pozisyonunu tespit etmek ve türe özgü davranışlarını eskiden olmadığı kadar tutarlı bir biçimde sınıflandırmak mümkün olmuştur (Wang ve Qiao, 2017). Ters pekiştirmeli öğrenme (Abbeel ve Ng, 2004) gibi modellerin hayvan deneylerinde kullanılması ile hayvanların davranışsal stratejileri ve motivasyonları da daha detaylı bir biçimde sınıflandırılabilir (Yamaguchi ve ark., 2018). Böylece bir döngü oluşmakta, yapay zekânın gelişmesiyle birlikte önce robotik sistemler, sonra onlarla iletişime geçen hayvanlar daha özgün davranmakta ve bu davranışsal çeşitlilik yine aynı yöntemlerle daha detaylı bir biçimde incelenmektedir.

Hayvan çalışmalarını yapay zekâ ve robotik ile birleştiren bu disiplinler arası çalışma sahası, sadece temel bilim ve robotik teknolojiye katkı sağlamayıp, ziraat (Henderson ve ark., 2001), havacılık (Folkertsma ve ark., 2017), güvenlik (Latif ve ark., 2016) ve arama kurtarma faaliyetleri (bkz. Bozkurt, Lobaton ve Sichitiu, 2016; Erickson ve ark., 2015; Latif ve ark., 2016; Yu ve ark., 2016) gibi çok çeşitli uygulamalara aktarılmaya başlanmıştır. Bu bakımdan hayvanların ve robotların beraber kullanımı, bilimsel ve teknolojik araştırmanın ötesinde geniş bir yelpazede öne çıkmaktadır.

Burada incelenen teknolojik uygulamaların deneysel hayvan çalışmalarına dâhil edilmesi, belirli düzeyde bir donanım ve yazılım bilgisi gerektirmektedir. Buna karşın, deneysel hayvan çalışmalarında robot kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Bu derleme, deneysel psikolojide robot kullanımının öncülü olan mekanik sistemlerden başlayarak hayvan deneylerindeki yenilikçi robotik uygulamaları kapsamlı bir biçimde incelenmiştir. Burada değinildiği üzere, robotik teknoloji ve deneysel hayvan çalışmalarının beraber kullanımı, çift yönlü bir biçimde her iki alana yapılan katkı bakımından değerlendirilmelidir. Bu derlemede üç ana başlık altında incelenen robotik sistemler ve ilişkili yapay zekâ modelleri, hem daha tutarlı ve güvenilir veri toplama araçları oluşturmakta hem de manuel veya mekanik yöntemlerle yapılamayacak keşifleri mümkün kılmaktadır. Ayrıca, minimum sayıda deney hayvanı ile mevcut kaynakların daha verimli kullanılmasını sağlamaktadır. Biyolojiden ilham alan robotik sistemler ve yapay zekâ uygulamaları ise çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Sürekli gelişen bu teknolojinin deneysel hayvan çalışmalarına sunduğu katkının gittikçe artacağı öngörülebilir. Bu bakımdan, gelecekte icra edilecek deneysel hayvan çalışmalarının robotik teknolojiden mümkün olduğunca yararlanması önemlidir.

Kaynaklar

- Abbeel, P. ve Ng, A. Y. (2004). Apprenticeship learning via inverse reinforcement learning. Twenty-first international conference on Machine learning - ICML '04 içinde . doi:10.1145/1015330.1015430
- Aghajan, Z. M., Acharya, L., Moore, J. J., Cushman, J. D., Vuong, C. ve Mehta, M. R. (2015). Impaired spatial selectivity and intact phase precession in two-dimensional virtual reality. *Nature Neuroscience*, 18(1), 121–128. doi:10.1038/nn.3884
- Alapan, Y., Yasa, O., Yigit, B., Yasa, I. C., Erkoc, P. ve Sitti, M. (2019). Microrobotics and Microorganisms: Biohybrid Autonomous Cellular Robots. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, 2(1), 205–230. doi:10.1146/annurev-control-053018-023803
- Ando, N. ve Kanzaki, R. (2017, Eylül). Using insects to drive mobile robots — hybrid robots bridge the gap between biological and artificial systems. *Arthropod Structure and Development*. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.asd.2017.02.003

- Balleine, B. W., Liljeholm, M. ve Ostlund, S. B. (2009, Nisan). The integrative function of the basal ganglia in instrumental conditioning. *Behavioural Brain Research*. Elsevier. doi:10.1016/j.bbr.2008.10.034
- Bartal, I. B. A., Decety, J. ve Mason, P. (2011). Empathy and pro-social behavior in rats. *Science*, 334(6061), 1427–1430. doi:10.1126/science.1210789
- Beer, R. D., Quinn, R. D., Chiel, H. J. ve Ritzmann, R. E. (1997). Biologically Inspired Approaches to Robotics. *Communications of the ACM*, 40(3), 30–38. doi:10.1145/245108.245118
- Benabid, A. L. (2003, Aralık). Deep brain stimulation for Parkinson’s disease. *Current Opinion in Neurobiology*. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.conb.2003.11.001
- Bozkurt, A., Lobaton, E. ve Sichitiu, M. (2016). A Biobotic Distributed Sensor Network for Under-Rubble Search and Rescue. *Computer*, 49(5), 38–46. doi:10.1109/MC.2016.136
- Brown, M. F. ve Brown, A. A. (2017). The promise of cyborg intelligence. *Learning and Behavior*, 45(1), 5–6. doi:10.3758/s13420-016-0249-7
- Butler, S. R. ve Fernández-Juricic, E. (2014). European starlings recognize the location of robotic conspecific attention. *Biology Letters*, 10(10). doi:10.1098/rsbl.2014.0665
- Buzsáki, G. (1989). Two-stage model of memory trace formation: A role for “noisy” brain states. *Neuroscience*, 31(3), 551–570. doi:10.1016/0306-4522(89)90423-5
- Buzsaki, G. ve Tingley, D. (2018). Space and Time: The Hippocampus as a Sequence Generator. *Trends in cognitive sciences*, 22(10), 853–869. doi:10.1016/j.tics.2018.07.006
- Dabney, W., Kurth-Nelson, Z., Uchida, N., Starkweather, C. K., Hassabis, D., Munos, R. ve Botvinick, M. (2020). A distributional code for value in dopamine-based reinforcement learning. *Nature*, 577(7792), 671–675. doi:10.1038/s41586-019-1924-6
- Dabney, W., Rowland, M., Bellemare, M. G. ve Munos, R. (2017). Distributional Reinforcement Learning with Quantile Regression. 32nd AAAI Conference on Artificial Intelligence, AAAI 2018, 2892–2901.
- de Margerie, E., Peris, A., Pittet, F., Houdelier, C., Lumineau, S. ve Richard-Yris, M. A. (2013). Effect of mothering on the spatial exploratory behavior of quail chicks. *Developmental Psychobiology*, 55(3), 256–264. doi:10.1002/dev.21019
- Diorio, C. ve Mavoori, J. (2003). Computer electronics meet animal brains. *Computer*, 36(1), 69–75. doi:10.1109/MC.2003.1160058
- Dirafzoon, A., Bozkurt, A. ve Lobaton, E. (2017). A framework for mapping with biobotic insect networks: From local to global maps. *Robotics and Autonomous Systems*, 88, 79–96. doi:10.1016/j.robot.2016.11.004
- Erickson, J. C., Herrera, M., Bustamante, M., Shingiro, A., Bowen, T. ve Lazzari, C. R. (2015). Effective stimulus parameters for directed locomotion in Madagascar hissing cockroach biobot. *PLoS ONE*, 10(8). doi:10.1371/journal.pone.0134348
- Eshel, N., Bukwich, M., Rao, V., Hemmelder, V., Tian, J. ve Uchida, N. (2015). Arithmetic and local circuitry underlying dopamine prediction errors. *Nature*, 525(7568), 243–246. doi:10.1038/nature14855
- Eshel, N., Tian, J., Bukwich, M. ve Uchida, N. (2016). Dopamine neurons share common response function for reward prediction error. *Nature Neuroscience*, 19(3), 479–486. doi:10.1038/nn.4239
- Faria, J. J., Dyer, J. R. G., Clément, R. O., Couzin, I. D., Holt, N., Ward, A. J. W., ... Krause, J. (2010). A novel method for investigating the collective behaviour of fish: Introducing “Robofish”. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 64(8), 1211–1218. doi:10.1007/s00265-010-0988-y
- Flynn, J. P. (1969). NEURAL ASPECTS OF ATTACK BEHAVIOR IN CATS. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 159(3 Experimental), 1008–1012. doi:10.1111/j.1749-6632.1969.tb12993.x

- Folkertsma, G. A., Straatman, W., Nijenhuis, N., Venner, C. H. ve Stramigioli, S. (2017). Robird: A Robotic Bird of Prey. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 24(3), 22–29. doi:10.1109/MRA.2016.2636368
- Foster, T. C., Castro, C. A. ve McNaughton, B. L. (1989). Spatial selectivity of rat hippocampal neurons: Dependence on preparedness for movement. *Science*, 244(4912), 1580–1582. doi:10.1126/science.2740902
- Fritsch, G. ve Hitzig, E. (1870). “Ueber die elektrische Erregbarkeit des Grosshirns”. *Archiv für Anatomie und Physiologie Wissenschaftliche Medizin*, 37(300), 300–332.
- Frohnwieser, A., Murray, J. C., Pike, T. W. ve Wilkinson, A. (2016, Ocak). Using robots to understand animal cognition. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*. Wiley-Blackwell Publishing Ltd. doi:10.1002/jeab.193
- Galef, B. G. ve Laland, K. N. (2005, Haziran). Social learning in animals: Empirical studies and theoretical models. *BioScience*. American Institute of Biological Sciences. doi:10.1641/0006-3568(2005)055[0489:SLIAES]2.0.CO;2
- Gianelli, S., Harland, B. ve Fellous, J. M. (2018). A new rat-compatible robotic framework for spatial navigation behavioral experiments. *Journal of Neuroscience Methods*, 294, 40–50. doi:10.1016/j.jneumeth.2017.10.021
- Glimcher, P. W. (2011). Understanding dopamine and reinforcement learning: The dopamine reward prediction error hypothesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(SUPPL. 3), 15647–15654. doi:10.1073/pnas.1014269108
- Göth, A. ve Evans, C. S. (2004). Social responses without early experience: Australian brush-turkey chicks use specific visual cues to aggregate with conspecifics. *Journal of Experimental Biology*, 207(13), 2199–2208. doi:10.1242/jeb.01008
- Gribovskiy, A., Halloy, J. I., Deneubourg, J.-L., Bleuler, H. ve Mondada, F. (y.y.). Towards Mixed Societies of Chickens and Robots. *Proceedings of the IEEE/RSJ 2010 International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2010)*. IEEE Press. doi:10.1109/IROS.2010.5649542
- Guthrie, E. R. ve Horton, G. P. (1946). *Cats in a puzzle box*. Oxford, England: Rinehart.
- Hachiga, Y., Schwartz, L. P., Silberberg, A., Kearns, D. N., Gomez, M. ve Slotnick, B. (2018). Does a rat free a trapped rat due to empathy or for sociality? *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, 110(2), 267–274. doi:10.1002/jeab.464
- Halloy, J., Sempo, G., Caprari, G., Rivault, C., Asadpour, M., Tâche, F., ... Deneubourg, J. L. (2007). Social integration of robots into groups of cockroaches to control self-organized choices. *Science*, 318(5853), 1155–1158. doi:10.1126/science.1144259
- Hassabis, D., Kumaran, D., Summerfield, C. ve Botvinick, M. *Neuroscience-Inspired Artificial Intelligence*. 95 *Neuron* 245–258 (2017). doi:10.1016/j.neuron.2017.06.011
- Henderson, J. V., Nicol, C. J., Lines, J. A., White, R. P. ve Wathes, C. M. (2001). Behaviour of domestic ducks exposed to mobile predator stimuli. 1. Flock responses. *British Poultry Science*, 42(4), 433–438. doi:10.1080/00071660120070668
- Hepper, P. G. (1986). Kin recognition: functions and mechanisms. A review. *Biological Reviews - Cambridge Philosophical Society*, 61(1), 63–93. doi:10.1111/j.1469-185X.1986.tb00427.x
- Heyes, C. M. (1994). Social learning in animals: Categories and mechanisms. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*. doi:10.1111/j.1469-185x.1994.tb01506.x
- Huai, R., Yang, J., Wang, H. ve Su, X. (2009). A new robo-animals navigation method guided by the remote control. *Proceedings of the 2009 2nd International Conference on Biomedical Engineering and Informatics, BMEI 2009 içinde* . doi:10.1109/BMEI.2009.5305809

- Huang, J. V., Wei, Y. ve Krapp, H. G. (2019). A biohybrid fly-robot interface system that performs active collision avoidance. *Bioinspiration and Biomimetics*, 14(6), 065001. doi:10.1088/1748-3190/ab3b23
- Ikemoto, S., Yang, C. ve Tan, A. (2015, Eylül). Basal ganglia circuit loops, dopamine and motivation: A review and enquiry. *Behavioural Brain Research*. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.bbr.2015.04.018
- Ishii, H., Aoki, T., Nakasuji, M., Miwa, H. ve Takanishi, A. (2004). Experimental study on interaction between a rat and a rat-robot based on animal psychology - analysis of basic factors necessary for a symbiosis between the rat and the robot. doi:10.1109/robot.2004.1307478
- Jolly, L., Pittet, F., Caudal, J. P., Mouret, J. B., Houdelier, C., Lumineau, S. ve De Margerie, E. (2016). Animal-to-robot social attachment: Initial requisites in a gallinaceous bird. *Bioinspiration and Biomimetics*, 11(1). doi:10.1088/1748-3190/11/1/016007
- Koo, B., Koh, C. S., Park, H.-Y., Lee, H.-G., Chang, J. W., Choi, S. ve Shin, H.-C. (2017). Manipulation of Rat Movement via Nigrostriatal Stimulation Controlled by Human Visually Evoked Potentials. *Scientific Reports*, 7(1), 2340. doi:10.1038/s41598-017-02521-6
- Kuwana, Y., Nagasawa, S., Shimoyama, I. ve Kanzaki, R. (1999). Synthesis of the pheromone-oriented behaviour of silkworm moths by a mobile robot with moth antennae as pheromone sensors. *Biosensors and Bioelectronics*, 14(2), 195–202. doi:10.1016/S0956-5663(98)00106-7
- Ladu, F., Bartolini, T., Panitz, S. G., Chiarotti, F., Butail, S., Macrì, S. ve Porfiri, M. (2015). Live predators, robots, and computer-animated images elicit differential avoidance responses in zebrafish. *Zebrafish*, 12(3), 205–214. doi:10.1089/zeb.2014.1041
- Laschi, C., Mazzolai, B., Patanè, F., Mattoli, V., Dario, P., Ishii, H., ... Takanishi, A. (2006). Design and development of a Legged rat robot for studying animal-robot interaction. *Proceedings of the First IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, 2006, BioRob 2006 içinde* . doi:10.1109/BIOROB.2006.1639160
- Latif, T., Whitmire, E., Novak, T. ve Bozkurt, A. (2016). Sound Localization Sensors for Search and Rescue Biobots. *IEEE Sensors Journal*, 16(10), 3444–3453. doi:10.1109/JSEN.2015.2477443
- Levison, P. K. ve Flynn, J. P. (1965). The objects attacked by cats during stimulation of the hypothalamus. *Animal Behaviour*, 13(2–3), 217–220. doi:10.1016/0003-3472(65)90037-0
- Lorenz, K. Z. (1937). The Companion in the Bird's World. *The Auk*, 54(3), 245–273. doi:10.2307/4078077
- Milford, M. J., Wyeth, G. F. ve Prasser, D. (2004). RatSLAM: A hippocampal model for simultaneous localization and mapping. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation içinde (C. 2004, ss. 403–408)*. doi:10.1109/robot.2004.1307183
- Milford, M., Jacobson, A., Chen, Z. ve Wyeth, G. (2016). RatSLAM: Using models of rodent hippocampus for robot navigation and beyond. *Springer Tracts in Advanced Robotics içinde (C. 114, ss. 467–485)*. Springer Verlag. doi:10.1007/978-3-319-28872-7_27
- Min, K., Kim, H. ve Huh, K. (2019). Deep Distributional Reinforcement Learning Based High-Level Driving Policy Determination. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles içinde (C. 4, ss. 416–424)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. doi:10.1109/TIV.2019.2919467
- Misawa, N., Fujii, S., Kamiya, K., Osaki, T., Takaku, T., Takahashi, Y. ve Takeuchi, S. (2019). Construction of a Biohybrid Odorant Sensor Using Biological Olfactory Receptors Embedded into Bilayer Lipid Membrane on a Chip. *ACS Sensors*, 4(3), 711–716. doi:10.1021/acssensors.8b01615
- Mitri, S., Wischmann, S., Floreano, D. ve Keller, L. (2013). Using robots to understand social behaviour. *Biological Reviews*, 88(1), 31–39. doi:10.1111/j.1469-185X.2012.00236.x
- Mnih, V., Kavukcuoglu, K., Silver, D., Rusu, A. A., Veness, J., Bellemare, M. G., ... Hassabis, D. (2015). Human-level control through deep reinforcement learning. *Nature*, 518(7540), 529–533. doi:10.1038/nature14236

- Morimura, T., Sugiyama, M., Kashima, H., Hachiya, H. ve Tanaka, T. (2010). Parametric Return Density Estimation for Reinforcement Learning. Proceedings of the Twenty-Sixth Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence içinde , UAI'10 (ss. 368–375). Arlington, Virginia, USA: AUAI Press.
- Myrick, A. J. ve Baker, T. C. (2011). Locating a compact odor source using a four-channel insect electroantennogram sensor. *Bioinspiration and Biomimetics*, 6(1). doi:10.1088/1748-3182/6/1/016002
- O'Neill, J., Pleydell-Bouverie, B., Dupret, D. ve Csicsvari, J. (2010). Play it again: reactivation of waking experience and memory. *Trends in neurosciences*, 33(5), 220–9. doi:10.1016/j.tins.2010.01.006
- Oyama, K., Hernádi, I., Iijima, T. ve Tsutsui, K. I. (2010). Reward prediction error coding in dorsal striatal neurons. *Journal of Neuroscience*, 30(34), 11447–11457. doi:10.1523/JNEUROSCI.1719-10.2010
- Patricelli, G. L., Uy, J. A. C., Walsh, G. ve Borgia, G. (2002). Male displays adjusted to female's response. *Nature*, 415(6869), 279–280. doi:10.1038/415279a
- Quinn, L. K., Schuster, L. P., Aguilar-Rivera, M., Arnold, J., Ball, D., Gygi, E., ... Chiba, A. A. (2018). When rats rescue robots. *Animal Behavior and Cognition*, 5(4), 368–379. doi:10.26451/abc.05.04.04.2018
- Romano, D., Donati, E., Benelli, G. ve Stefanini, C. (2019). A review on animal–robot interaction: from bio-hybrid organisms to mixed societies. *Biological Cybernetics*, 113(3), 201–225. doi:10.1007/s00422-018-0787-5
- Rundus, A. S., Owings, D. H., Joshi, S. S., Chinn, E. ve Giannini, N. (2007). Ground squirrels use an infrared signal to deter rattlesnake predation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(36), 14372–14376. doi:10.1073/pnas.0702599104
- Schaul, T., Quan, J., Antonoglou, I. ve Silver, D. (2016). Prioritized Experience Replay. 4th International Conference on Learning Representations, ICLR 2016 - Conference Track Proceedings.
- Schrock, L. E., Mink, J. W., Woods, D. W., Porta, M., Servello, D., Visser-Vandewalle, V., ... Okun, M. S. (2015, Nisan). Tourette syndrome deep brain stimulation: A review and updated recommendations. *Movement Disorders*. John Wiley and Sons Inc. doi:10.1002/mds.26094
- Sesack, S. R. ve Grace, A. A. (2010, Ocak). Cortico-basal ganglia reward network: Microcircuitry. *Neuropsychopharmacology*. Nature Publishing Group. doi:10.1038/npp.2009.93
- Shah, A. (2012). Psychological and neuroscientific connections with reinforcement learning. *Adaptation, Learning, and Optimization içinde* (C. 12, ss. 507–537). Springer Verlag. doi:10.1007/978-3-642-27645-3_16
- Shi, Q., Ishii, H., Kinoshita, S., Konno, S., Takanishi, A., Okabayashi, S., ... Kimura, H. (2013). A rat-like robot for interacting with real rats. *Robotica*. doi:10.1017/S0263574713000568
- Shi, Q., Ishii, H., Kinoshita, S., Takanishi, A., Okabayashi, S., Iida, N., ... Shibata, S. (2013). Modulation of rat behaviour by using a rat-like robot. *Bioinspiration & Biomimetics*, 8(4), 46002. doi:10.1088/1748-3182/8/4/046002
- Shi, Q., Ishii, H., Tanaka, K., Sugahara, Y., Takanishi, A., Okabayashi, S., ... Fukuda, T. (2015). Behavior modulation of rats to a robotic rat in multi-rat interaction. *Bioinspiration and Biomimetics*, 10(5). doi:10.1088/1748-3190/10/5/056011
- Skinner, B. F. (1932). On the rate of formation of a conditioned reflex. *Journal of General Psychology*, 7(2), 274–286. doi:10.1080/00221309.1932.9918467
- Skinner, B. F. (1948). “Superstition” in the pigeon. *Journal of Experimental Psychology*, 38(2), 168–172. doi:10.1037/h0055873
- Skinner, B. F. (1959). *Cumulative record*. Cumulative record. East Norwalk, CT, US: Appleton-Century-Crofts.

- Staddon, J. E. R. ve Cerutti, D. T. (2003). Operant Conditioning. *Annual Review of Psychology*, 54(1), 115–144. doi:10.1146/annurev.psych.54.101601.145124
- Steager, E. B., Wong, D., Mishra, D., Weiss, R. ve Kumar, V. (2014). Sensors for micro bio robots via synthetic biology. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation* içinde (ss. 3783–3788). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. doi:10.1109/ICRA.2014.6907407
- Takanishi, A., Aoki, T., Ito, M., Ohkawa, Y. ve Yamaguchi, J. (1998). Interaction between creature and robot - development of an experiment system for rat and rat robot interaction. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems* içinde (C. 3, ss. 1975–1980). doi:10.1109/iros.1998.724896
- Talwar, S. K., Xu, S., Hawley, E. S., Weiss, S. A., Moxon, K. A. ve Chapin, J. K. (2002). Rat navigation guided by remote control. *Nature*, 417(6884), 37–38. doi:10.1038/417037a
- Tan, X., Lee, Y., Chng, C. B., Lim, K. Bin ve Chui, C. K. (2020). Robot-assisted flexible needle insertion using universal distributional deep reinforcement learning. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 15(2), 341–349. doi:10.1007/s11548-019-02098-7
- Thorndike, E. L. (1913). *The psychology of learning* (C. 2). Teachers College, Columbia University.
- Ünal, G. (2019). The Cortico-hippocampal Circuit: The Brain's Center for Mapping and Declarative Memory. *J Ankara Univ Fac Med*, 72, 13–23.
- Unal, G. ve Canbeyli, R. (2019). Psychomotor retardation in depression: A critical measure of the forced swim test. *Behavioural brain research*, 372, 112047. doi:10.1016/j.bbr.2019.112047
- Wang, Z. ve Qiao, H. (2017). Behavior classification and image processing for biorobot-rat interaction. *Proceedings of 2017 IEEE 7th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication, ICEIEC 2017* içinde (ss. 572–575). doi:10.1109/ICEIEC.2017.8076631
- Yamaguchi, S., Naoki, H., Ikeda, M., Tsukada, Y., Nakano, S., Mori, I. ve Ishii, S. (2018). Identification of animal behavioral strategies by inverse reinforcement learning. *PLoS Computational Biology*. doi:10.1371/journal.pcbi.1006122
- Yu, Y., Pan, G., Gong, Y., Xu, K., Zheng, N., Hua, W., ... Wu, Z. (2016). Intelligence-augmented rat cyborgs in maze solving. *PLoS ONE*, 11(2). doi:10.1371/journal.pone.0147754