

심리학 및 행동생물학적 연구에서 동물 로봇의 활용과 전망

Perspectives on the Use of Robots in Etho-experimental Approaches to Animal Behavior

최준식[†]

June-Seek Choi[†]

Abstract: Utilization of small robots in psychology and biology provides a new breakthrough in understanding the neurobiological mechanisms of various animal behavior. The expansion of robot use in animal research is partly due to increased availability of economically plausible mobile robots and also due to the current shift in animal research toward more ecologically valid experiments. Ground-breaking experimental findings are expected when the behavioral variables are manipulated in more natural situations. In addition, the results from laboratory could be generalized more easily with added ecological validity. The current paper attempts to review a wide range of applications of animal robots used to study animal behavior and to highlight major advantages and limitations. In particular, this review focuses more on the psychological impact of animal robots than engineering details about their structure and operation. Finally, this review will provide some practical considerations when employing robots in animal experiments.

Keywords: Animal-robot Interaction, Etho-experimental Approach, Social Behavior, Anti-predatory Behavior, Defensive Behavior

1. 서 론

심리학에서 동물 모델을 활용한 연구는 인간의 학습, 기억, 정서, 인지기능은 물론 정신질환의 발생과정을 이해하기 위해서, 오랜 전통을 가지고 발전해 온 분야이다. 특히 학습 심리학과 생물 심리학 분야에서는 인간보다는 동물 대상 연구가 오히려 주류를 이루어 왔다. 대표적으로 개를 피험 동물로 활용한 I. P. Pavlov의 고전적 조건형성에 관한 연구는 자극과 자극 간의 연합이 형성되는 원리를 규명하였고^[1], 고양이를 피험 동물로 활용한 E. L. Thorndike의 도구적 조건화 연구는^[2] 효과의 법칙(law of effect)을 탄생시켰다. 고전적 조건화는 현대에 와서는 학습의 뇌신경과학적 메커니즘을 규명하는 모델 시스템으로 광범위하게 활용되어 시냅스 가소성에 관한 분자생물학 및 유전공학적 연구로 이어졌고^[3], 도구적 조건화는 보상과 행동 통제에 관여하는 뇌의 도파민 회로 연구^[4] 물론 인공지능

의 핵심 알고리즘 중 하나인 강화학습의 개발^[5]에도 결정적인 이론적 바탕을 제공하였다.

또 다른 전통에서의 동물연구는 행동생물학(ethology) 분야로서 대부분 동물의 행동을 통제하지 않는 자연스러운 상황(field)에서 관찰을 통해 이론적 해석을 도출하는 방식을 택한다. 대표적인 행동생물학자인 K. Lorenz에 의해 수행된 조류의 각인(imprinting) 연구는 오리가 알에서 깨어나 어미를 인식하는 과정을 관찰하면서 이루어졌다^[6]. 뿐만 아니라 Lorenz와 공동으로 노벨상을 수상한 K. von Frisch에 의한 꿀벌의 춤 연구^[7], N. Tinbergen에 의한 가시고기의 영역 수호 행동 연구^[8] 등은 동물에게 본능적으로 프로그램 된 행동(fixed action pattern)들의 표현 패턴을 상세히 규명하고 이러한 행동을 유발하는 신호 자극(sign stimulus)의 특성을 체계적으로 기술하였다. 동물행동학 분야는 다양한 동물행동에 대한 이해를 증진시키는 많은 유용한 연구결과를 생산하였을 뿐 아니라 인간 행동의 이해에 관한 많은 비교심리학적 통찰을 제공하는 등 사회적으로도 큰 과장을 일으켰다^[9].

철저한 자극통제를 요구하는 실험심리학적 연구와 동물의 행동을 최대한 방해하지 않으려는 행동생물학적 연구는 방법

Received : Jan. 13. 2022; Revised : Jan. 17. 2022; Accepted : Jan. 17. 2022

* This study was supported by a faculty research grant from the College of Liberal Arts at Korea University in 2018

† Professor, Corresponding author: School of Psychology, Korea University, Seoul, Korea (j-schoil@korea.ac.kr)

론은 물론 근본적인 연구철학의 차이로 인하여 지난 세기 독립적이고 분리된 학문 영역을 형성하여 왔다. 실험 심리학은 자극의 통제를 중요시하기 때문에 비교적 간단한 패턴의 청각이나 시각자극을 주로 사용하여 왔지만 그로 인해 실제로 자연상황의 동물이 처리하는 복잡한 자극들 특히 같은 종 내의 다른 개체(*conspecific*)이나 포식자(*predator*)가 지닌 다감각적 속성에 대한 연구가 부족한 측면이 있다. 반면에 행동생물학의 관찰기반 데이터들은 인과관계를 뚜렷이 증명하기 어려울 뿐 아니라 뇌신경계의 조작과 같은 첨단 연구 기법을 적용하기 어려운 한계를 지닌다. 물론 오래 전부터 소수의 연구자들이 실험심리학과 행동생물학적 방법론을 결합하여 실험-행동생물학적(*etho-experimental approach*) 접근 방식을 채택한 연구를 수행해 왔고 중요한 학문적 기여를 낳았지만¹⁰⁾, 생태학적 타당도가 높은 자극을 구성하기 위한 방법론적 어려움은 여전히 존재해 왔다.

그러나 최근 들어 두 학문적 전통을 기반으로 발전하는 신생 연구 분야들, 특히 행동 신경과학(*behavioral neuroscience*) 분야에서는 이러한 경계를 넘어서려는 경향이 뚜렷해지고 있는데 이를 촉진하는 요인 중 하나는 로봇의 도입이다. 로봇을 이용해서 실험실 상황의 생태학적 타당도를 높이고 대상 동물들이 최대한 자연상황에서 발생하는 행동을 표현할 수 있도록 유도함으로써 행동생물학과 실험심리학의 장점을 모두 구현하고자 하는 것이다¹¹⁾. 특히 동물의 사회적 행동에 관한 연구¹²⁾나 포식자의 위협에 대한 방어반응의 연구¹³⁾는 로봇의 도입으로 독창적인 실험 패러다임을 구성하고 새로운 통찰을 제공할 수 있는 데이터를 발표하고 있다. 본 논문에서는 엔지니어링 측면이 아닌 동물실험 연구자의 관점에서 로봇을 도입한 실험실 연구들의 범위와 특징들을 살펴보고 추후 행동신경과학적 연구들이 이러한 새로운 관점에서의 접근을 통해 발전될 수 있는 전망과 개선점을 논의해보고자 한다.

2. 동물 연구에 활용되는 로봇의 종류와 범위

동물-로봇 상호작용을 본 연구들 중 본 개관의 취지에 맞는 대표적인 연구들을 일부 선정하여 [Table 1]에 요약하였다. 표를 통해 보여지는 가장 뚜렷한 경향은 곤충에서 침팬지에 이르는 다양한 대상 동물들의 행동 연구에 로봇이 활용되고 있다는 사실이다.

2.1 애니마트론 공학(Animatronics)에서의 동물 행동 연구

자연은 기술적 혁신의 중요한 원천이며 따라서 생체모방공학(*Bio-inspired engineering*)은 다양한분야에서 새로운 제품이나 개념의 발굴에 중요한 역할을 했지만 특히 로봇 분야에

서는 인간의 보행, 언어, 정서표현 등 여러 측면을 모사하는 휴머노이드(*humanoid*) 분야나 다양한 동물 종들의 독특한 행동을 모사한 애니마트론 분야가 핵심적인 위치를 차지하고 있다. 이러한 연구분야의 궁극적인 목표는 대상 생명체의 기능을 가능한 한 완벽하게 모사하는 것이고 이를 위해 각종 공학적 기술을 개발하는 연구가 주류를 이룬다. 실제로 그러한 목표가 완전히 달성되기까지는 기술적 허들이 많이 남아 있고 특히 인간과 동물의 심리적 기능-적응적 지능, 의사결정, 감정 표현 등은 아직도 미지의 영역으로 취급되고 있다. 그러나 현 시점의 기술 수준으로 개발된 휴머노이드나 애니마트론들만으로도 충분히 흥미로운 개체간 상호작용이 가능하며 실제로 휴먼-로봇 인터랙션(*human-robot interaction: HRI*) 혹은 동물-로봇 인터랙션(*animal-robot interaction: ARI*) 분야는 급속하게 팽창하며 로봇공학의 영역을 심리학과 인지과학으로까지 확장하고 있다.

인공적인 생명체(*cybernetics*) 연구의 시조라고 할 수 있는 G. Walters가 발명한 탐색하는 기계(*Machina Speculatrix*: 거북이 모양을 닮았다고 해서 *tortoise*라고도 불림)의 경우에도 공학적인 기술의 완성보다는 이러한 기계가 예측 불가능한 방식으로 활동하는 패턴이 나타나는 것에 주목하였다¹⁴⁾. 거북이 로봇은 광센서와 이를 처리하는 아날로그 회로가 구동계에 연결된 간단한 시스템으로 구성되어 있지만 이러한 원시적인 애니마트론이 돌발적 요소가 많은 자연스러운 환경(일반 가정)에서 자연적인 생명체(Walters의 가족을 비롯한 인간들)는 물론 인공적인 생명체(두 대의 거북이 로봇)를 만나면서 관찰자가 보기에 복잡하면서도 의미 있는 상호작용을 만들어냈다는 점은 현대의 로봇연구에 시사하는 바가 크다¹⁵⁾.

현대의 애니마트론 분야는 동물의 특성들을 최대한 유사하게 기술적으로 구현하는 것을 목표로 한다. 이러한 공학적 연구의 특성상 개발된 동물로봇들의 성능이나 외양은 공학자 혹은 일반인들이 납득할 만한 완성도를 지니는 것을 당연한 필요조건으로 하고 있다. 특히 시각적 존재인 인간의 입장에서 완성도를 평가하다 보니 외양이나 움직임에서는 놀라운 발전을 이룩하고 있다([Table 1] No. 1, 2, 3, 4, 5).

그러나 동물로봇의 완성도는 인간인 연구자의 판단만으로는 충분하지 않다는 한계가 분명히 존재하고 따라서 성능에 대한 평가는 궁극적으로 대상 동물과의 자연적인 상호작용 속에서 이루어지고 있다. 예를 들어 일본 와세다 대학의 공학자들이 만든 로봇의 경우 크기, 형태, 자연스러운 움직임 등의 측면에서 쥐(*rat*)와 유사하게 보이는 수준으로 쥐 로봇을 구현하였다. 특히 디축 관절을 장착하여 진짜 쥐의 걸음걸이와 유사한 방식으로 이동할 수 있게 함으로써 로봇이 진짜 쥐들에게서 보이는 것과 유사한 방식의 친사회적 및 반사회적 상호작용을 끌어낼 수 있음을 시연하였다([Table 1] No. 1, 2). 또 미국

뉴욕대학의 공학자들이 제작한 물고기 로봇들은 진짜 제브라 피시(zebrafish)에게서 군집행동을 유발하기도 하였고([Table 1] No. 1, 3), 포식자에 대해 보이는 도피행동 패턴을 유발하기도 하였다([Table 1] No. 4). 실제로 이 경우 로봇 물고기의 외양이나 동작의 완성도만으로는 연구자가 진짜 물고기에게 어떤 식으로 지각될 것인지를 판단하는 것이 거의 불가능하므로 진짜 물고기와의 상호작용이 로봇의 성능을 판단하는 유일한 기준이 될 수밖에 없다.

결론적으로 애니마트론 개발에 종사하는 대부분의 로봇 학자들이 의도적이지는 않다 하여도 이미 실험심리학이나 행동 생물학적 연구를 동시에 수행하고 있는 셈이 된다. 따라서 공학자들이 주도하는 연구에서도 로봇의 외양이나 구동 방식 혹은 제어 기술의 발전만큼이나 동물과의 상호작용을 반영하는

행동 데이터의 비중이 커지고 있는 추세이다. 또한 연구 내용이 애니마트론 공학과 동물행동학 양쪽을 모두 포함함에 따라 자연스럽게 두 분야의 학자들이 공동연구를 시도하는 사례도 증가하고 있다. 예를 들어 포식자인 방울뱀의 행동 패턴 연구를 위해 피식자인 다람쥐의 형상을 모사한 로봇을 개발하여 방울뱀의 공격행동이 다람쥐의 외형이나 동작은 물론 미묘한 적외선 방출량에 따라 조절됨을 체계적으로 규명할 수 있었다 ([Table 1] No. 5).

2.2 실험심리학 및 행동생물학 분야에서의 로봇 활용

실험심리학에서 최초의 로봇활용은 H. Harlow의 기념비적인 원숭이 애착연구에서 시도되었다고 볼 수 있다^[6]. 어린 새

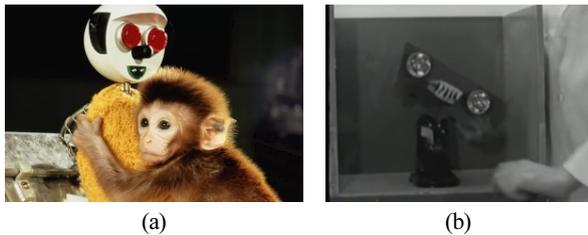
[Table 1] Types and characteristics of robots used in animal-robot interaction studies

No.	Types of robot	Major functional characteristics	Target animal and behavior	Main results	References
1	Rat robot	Carefully crafted to look very much like a real rat. Expresses realistic body movements due to multi-axis joints.	Rat social behavior	Social interaction shown in real rats.	[17]
2	Rat robot	Same as above.	Rat escape /defensive behavior	Continuous attack by the robot produced depression-like symptoms.	[18]
3	Fish robot	Bigger in body size but kept the aspect ratio.	Zebrafish social behavior	Swimming robot produced Herding behavior.	[19]
4	Fish robot	Similar to the predator fish (Oscar fish) in size, shape, and swimming motion.	Zebrafish escape/ defensive behavior	Fear responses including avoidance were measured.	[20]
5	Squirrel robot	Similar shape and size to the actual squirrel. Mimics squirrel behavior and releases infrared signal.	Rattlesnake predation behavior	Rattlesnakes adjusted their predation behavior depending on whether the robot releases infrared signal or not.	[21]
6	Alligator robot	Shaped like an alligator but smaller (~40 cm). Moves back and forth fast on wheels. Threatening jaw action.	Rat defensive behavior	Fear responses including freezing, avoidance and foraging suppression.	[13]
7	Spider robot	A spider-shaped toy. Can adjust the movement direction with a remote controller.	Mouse group defensive behavior	Group dynamics in escape behavior modulated by other mice.	[22]
8	Humanoid robot	A small human-shaped robot (~45 cm). Neck, arms, and legs can be controlled to produce programmed action.	Chimpanzee pro-social behavior	Chimpanzees showed play invitations in response to the robot's action.	[23]
9	Frog robot	Shaped like a real frog with a vocal-sac of which size can be precisely controlled. Audio to reply frog vocalization.	Frog mating behavior	Timing between frog's vocal-sac pulsation and the advertisement call was critical for male frog's approach behavior.	[24]
10	Cockroach robot	A micro mobile platform carrying pheromone-like chemicals.	Cockroach pro-social behavior	Group behavior of cockroaches was controlled by the robots.	[12]
11	Small mobile robot	Mobile platform on wheels allows controllable movement in all four-directions.	Rat pro-social behavior	Rats followed the robot.	[25]
12	Small mobile robot	Same as above.	Rat pro-social behavior	Rats showed reciprocal cooperation with the robot.	[26]
13	Small mobile robot	Same as above plus temperature control.	Quail pro-social behavior	Quail chicks displayed attachment behavior to the robot.	[27]

끼 원숭이가 어미가 없는 상황에서 딱딱한 철사 혹은 부드러운 천으로 만들어진 두 종류의 인공적인 대리모 중 하나를 선택하게 하는 실험을 통해 초기 발달단계에서 신체적 접촉이 애착에 미치는 중요성을 밝혀낼 수 있었다. 이 과정에서 사용된 대리모는 사실상 현대적인 의미에서의 로봇에는 미치지 못하는 조악한 인형 수준의 인공물이었으나[Fig. 1] 새끼 원숭이가 이를 어미 혹은 의지할 수 있는 대상으로 여기기에는 충분했다는 점에서 현대의 동물로봇 활용 연구에 미치는 시사점이 크다. 또한 새끼 원숭이의 정서 반응을 보기 위해 개발된 포식자 로봇 역시도 공학적 완성도나 생태학적 타당도가 높지 않았음에도 즉각적인 공포와 도망 반응을 효과적으로 유발할 수 있었다[Fig. 1].

행동생물학에서도 역시 로봇이라고 부르는 미흡하지만 동물의 형상을 흉내 낸 복합자극으로서의 인공물을 연구에 사용한 바 있다. 전술한 Tinbergen의 유발 자극 연구를 예로 들면 번식기 가시고기의 영역 방어 행동이 다른 수컷의 출현에 의해 유발된다는 사실은 자연관찰을 통해 확인되었지만 과연 다른 수컷의 어떤 형태적 특성이 공격행동을 유발하는지에 대한 해답은 가시고기와 유사한 형태의 물고기 형상을 체계적으로 변형시켜가면서 제시해야만 얻어질 수 있을 것이다. 실제로 Tinbergen은 나무토막으로 제작한 자극형태를 활용한 일련의 실험을 통해 똑같은 물고기 형상이라도 배에 붉은 반점을 칠해서 제시하면 수컷으로 인식해서 공격을 하지만 반점을 지우면 암컷으로 인식해서 구애행동을 시작함을 보였다. 즉 물고기 형상과 배에 있는 반점의 유무가 특정 행동을 시작하는 유발 자극인 것이다⁸⁾. 이러한 실험-행동생물학적 접근은 자극이 유효성이 인간 위주의 관점(human-centered orientation)이 아닌 동물의 관점에서 평가되어야 한다는 점에서 현대적 의미의 ARI와 일맥 상통하는 기준을 가진다.

최근 20년간은 다양한 분야에서 심리학자와 행동생물학자들이 로봇을 활용한 연구를 통해 새로운 관점에서의 가설들을 검증하는데 성공하고 있는 추세를 보여준다. 이러한 로봇 활용연구의 주된 목적은 몇가지로 분류할 수 있다. 첫째,



[Fig. 1] Harlow's robots used in animal experiments; (a) A mother monkey robot used for Harlow(1960)'s attachment study, (b) A predator robot. (Image reference: Martin Rogers/Getty Images)

현실적으로 실험실에서 구현하기 어려운 자연적인 상황을 동물 로봇을 통해 최대한 유사하게 대처함으로써 생태학적으로 타당한, 자연상태에서 관찰 가능한 행동을 실험실에서 신뢰롭게 재현하고자 하는 것이다. 예를 들어 쥐가 고양이와 같은 포식자에 대해 보이는 도피행동이나 방어반응에 관한 연구를 실험실에서 재현하는 연구는 거의 희소하다. 그 이유는 실제로 쥐와 고양이의 사육시설을 동시에 유지하는 것이 많은 비용을 수반하기도 하지만 자극으로 사용하는 진짜 고양이가 매번 똑 같은 방식으로 행동하지 않기 때문에 쥐가 보이는 행동 데이터를 해석하기 불가능한 경우가 많기 때문이다. 따라서 로봇 포식자를 활용한 연구는 이런 한계에 대한 최선의 대안이라고 볼 수 있다([Table 1] No. 6). 흥미롭게도 이러한 방어행동은 실제로 자연상황에 존재하는 포식자와 유사한 형태가 아닌 동물에게 전혀 생소한 인공적인 로봇에 대해서도 발생하였다([Table 1] No. 7). 포식자 로봇뿐만 아니라 간단한 휴머노이드 로봇을 조작하여 침팬지의 친사회적 행동을 유도하기도 하였다([Table 1] No. 8). 둘째, 행동생물학적 필드 관찰의 한계는 동물의 행동을 일으키는 생태학적 유발자극을 통제할 수 없다는 점인데 로봇을 이용하면 이를 넘어서는 연구가 가능하다는 점이다. 로봇의 동작이나 소리, 냄새, 광소자 등을 통해 유발자극의 다감각적 통합을 체계적으로 파악할 수 있게 된다([Table 1] No. 9). 또한 단일한 인공개체의 행동뿐 아니라 다수의 인공개체를 동시에 체계적으로 통제할 수 있다는 장점을 활용하여 바퀴벌레의 집단 행동 다이내믹을 규명한 연구([Table 1] No. 10) 등은 로봇의 활용이 아니고는 불가능한 가설 검증을 가능하게 하였다. 셋째, 심리학자나 행동생물학자가 관심있는 자극속성을 검증하기 위해 공학적 완성도보다는 동물의 지각에 효과적인 특성의 조합이 중요하다는 점이다. 따라서 간단한 모바일 플랫폼을 통해서도 움직임의 구현방식이나 감촉, 온도 같은 감각적 속성을 잘 조합함으로써 효과적인 사회적 행동([Table 1] No. 11, 12)이나 애착행동([Table 1] No. 13)을 유도할 수 있었다. 이는 이러한 모바일 플랫폼이 저비용이고 공학적 전문성을 가지지 않은 동물연구자들에게도 쉽게 활용이 가능하다는 점을 고려할 때 매우 고무적이다([Table 1] No. 11, 12, 13). 추가적으로 친사회적 행동을 연구하기 위해 제작된 로봇이 약간의 소프트웨어적 변형을 통해 정 반대의 스트레스 유발행동을 할 수 있게 프로그램될 수 있었던 사례들도 로봇 활용 연구의 장점을 대변한다(예를 들어 [Table 1] No. 1, 2, 3, 4). 즉 한가지 형태의 로봇 프로토타입을 개발할 경우 상당히 다양한 방향으로 행동변화의 폭을 극대화할 수 있기에 연구자가 초기에 비용과 시간을 투자할 가치가 충분히 있다고 판단된다.

2.3 동물 행동 실험에서 로봇활용의 현실적 고려

동물실험에서 요구되는 로봇은 고사양이나 첨단기법의 적용을 필요로 하지는 않지만 기본적인 구성요소는 일반적인 로봇 제작과 다르지 않다. 즉 외형을 이루는 프레임, 움직임을 담당하는 구동부, 그리고 이를 통제할 수 있는 전자 회로와 소프트웨어의 4가지 요소가 주축을 이룬다. 공학적인 관점에서는 이 모든 측면에서 완성도를 높이는 것이 중요하겠지만 실험자의 입장에서는 비용과 시간을 고려하여 최소한의 사양으로 최대의 실험효과를 추구하는 타협적인 태도가 중요하다.

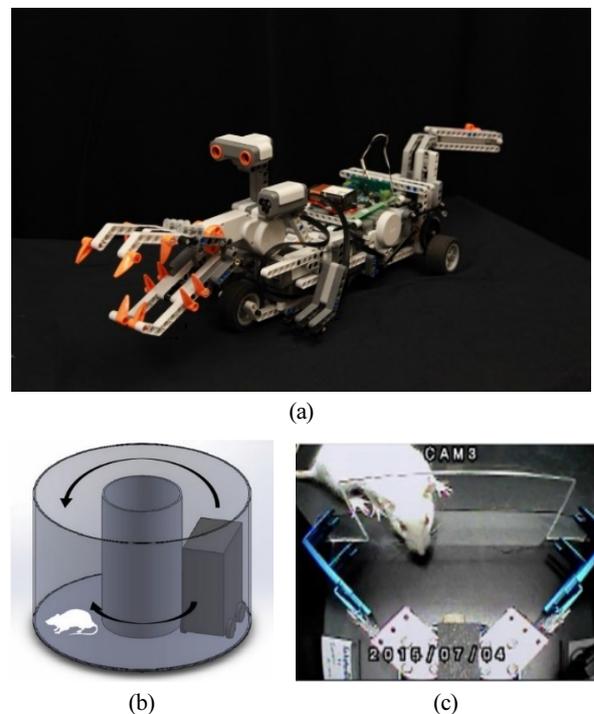
물론 가능하다면 로봇 공학자가 필요한 로봇을 제공하고 실험자는 이를 활용한 실험에 집중하는 협력연구의 형태가 가장 이상적이겠으나 이러한 형태는 현실적으로 가능성이 높지 않다. 저자 역시도 연구 초기에는 협력연구에 관심이 있는 공학자를 수소문하였으나 실패하였다. 그 이유의 가장 저변에는 연구규모의 비대칭이 존재한다. 즉 로봇 연구의 인적 및 물적 규모가 동물행동 연구보다 더 큰 경우가 많아 동물실험연구자가 로봇 제작을 주문하는 형태의 요청을 받아들이기 어려울 수밖에 없는 상황이었다. 따라서 오히려 로봇연구자가 제작된 로봇의 검증을 위해 동물실험연구자를 초대하는 방식의 협업이 더 바람직할 것으로 생각된다.

로봇의 구축에 있어서 가장 효율적인 것은 제작에 필요한 4가지 요소가 턴키 형식으로 제공되는 완성품을 구매하는 것이겠지만 동물실험의 특수한 요구조건을 만족시키는 솔루션은 거의 존재하지 않는다고 보는 것이 합당할 것이다. 그러나 동물실험자가 실험에 요구되는 최소한의 사양만을 정확히 파악할 수 있다면 불가능하지는 않다. 물론 이러한 조건이 무엇인지는 구체적으로 실험을 통해서만 파악할 수 있기에 순환론적인 모순에 빠지기는 하지만 간단한 파일럿 실험이나 연구자의 오랜 경험을 통해 선제적으로 이러한 사양에 대한 설계를 해 볼 수 있을 것이다. 실제로 저자가 로봇활용 연구의 초기에 도입한 로봇은 덴마크 L사의 조립형 완구로 제작하였다[Fig. 2(a)]. 로봇의 외형, 2축의 바퀴와 1축의 턱관절, 통제회로 및 소프트웨어가 사용하기 쉬운 형태로 제공되기에 로봇제작에 소요된 기간은 1주일일 채 걸리지 않았다. 그 시간의 대부분도 실제 로봇의 제작이라기 보다는 신뢰성이 떨어지는 블루투스 통신을 대처하기 위한 장비(자동차 도어락 리모콘을 개조)를 찾고 검증하는 데 소요되었다. 그러나 장난감 수준의 외관에도 불구하고 이 악어 로봇은 파일럿 실험에서 높은 수준의 공포반응을 유발하였고(대부분의 쥐들이 등지에 숨어서 한동안 나오지 못했다) 이후 이루어진 실험들에서 중요한 생태학적 자극으로서 기능하였으며 다른 연구실에서도 도입되어 동물의 공포행동 연구에 있어 중요한 기여를 하였다^[28].

또 하나 중요한 고려사항은 로봇의 외형을 결정하는 데 있

어 선입견을 가질 수 있는 인간 연구자의 판단보다는 실제 동물의 관점을 중심으로 판단하는 것이 좋다는 점이다. 전술한 연구에서 방어행동유발에 필요한 요소가 외형보다는 크기와 속도라는 점이 발견되었고 따라서 후속 연구에서는 굳이 복잡한 외관을 지닌 악어 형태의 로봇이 아닌 단순한 사각형 형태의 추적자 로봇을 제작하여 움직이는 속도만을 조절하였음에도 동등한 효과를 얻을 수 있었다^[29] [Fig. 2(b)]. 또한 다른 연구에서는 악어로봇의 이동성을 없애고 턱관절 움직임만을 따로 분리하여 쥐가 먹이를 얻기 위해 접근과 회피를 반복하는 갈등행동을 연구하는 데 응용이 가능하였다^[30] [Fig. 2(c)]. 즉 첨단 기술의 발달이 없더라도 실험자가 적극적인 아이디어를 통해 로봇을 개조하거나 변형시킴으로써 효과적인 실험 설계가 가능해질 수 있다.

그럼에도 불구하고 동물실험자는 로봇제작에 관한 새로운 기술이나 가용한 제품에 관한 최신정보에는 어두울 수밖에 없다. 예를 들어 쥐가 사실상 시각보다는 후각이나 촉각에 더 의존하는 동물이기에 추후 연구에서는 이러한 감각차원을 제공할 수 있는 로봇이 필요할 수 있음을 시사한다. 그러나 이러한 자극들을 얼마나 용이하게 실험에 도입할 수 있을지에 대한 판단이나 도움은 공학자와의 협력을 통해서만이 가능하다. 예를 들어 최근 소프트 로봇 분야에서는 플라스틱이나 금속이 아닌 부드러운 피부와 유기체와 유사한 표면 움직



[Fig. 2] Examples of simple robots used in rat studies; (a) An alligator-shaped predator robot^[13], (b) A box-shaped chasing robot^[29], (c) Lobster-bot: A biting robot^[30]

임이 가능한 로봇을 개발하고 있고 이는 즉각적으로 새로운 동물실험에 접목될 수 있는 가능성을 제공한다^[11]. 따라서 어떤 형식이든 로봇 공학자와의 지속적인 교류나 컨설팅은 매우 중요하다.

3. 결론 및 전망

본 논문에서는 곤충에서 침팬지에 이르는 다양한 동물들을 대상으로 한 실험-행동생물학적 연구에서 로봇의 활용이 중요한 방법론으로 자리잡고 있음을 확인하였다. 물론 지난 세기 동안 동물모델을 활용한 뇌신경과학적 연구들이 인지, 학습, 정서 등의 심리적 과정을 설명하는 중요한 발견들을 성취했지만 대부분 극히 제한적인 실험실 상황에서 매우 단순한 물리적 자극을 통해 이루어졌기 때문에 과연 동물들이 자연스러운 상황에서 대응하는 행동양식을 대표할 수 있을 것인지에 대한 의문, 즉 일반화(generalization)의 문제를 내포하고 있었다. 따라서 로봇을 활용한 동물모델의 연구는 이러한 일반화 가능성을 확장시켜 줄 수 있는 중요한 방법론적 혁신이라고 할 수 있다.

또한 전통적으로 로봇의 공학적인 완성도에 집중해온 애니마론 분야에서도 심리학 분야 및 행동생물학 분야에서 다루어지는 행동 데이터에 비견할 만한 양과 정밀성을 확보하고 있음을 확인하였다. 즉 이제는 공학적 개발과 동물행동연구가 분리되는 것이 아니고 하나로 통합되는 추세로 보인다. 이는 마치 HRI 분야에서 컴퓨터 공학자, 디자이너, 심리학자들이 전공을 넘어서는 협력과 주제의 공유를 모색하고 있는 상황에 비교할 수 있고 앞으로도 동물행동 연구에서도 이러한 융합적 트렌드는 계속될 것으로 보인다. 학습심리학의 핵심원리들이 Pavlov의 개를 활용한 조건반사와 스키너 박스 속에서 레버누르기를 학습하는 쥐의 연구에서 심화되고 검증된 후에 인간 행동으로 확장되었던 역사가 존재하듯이 미래에는 로봇분야에서도 HRI의 핵심 원리들이 ARI를 통해서 도출될 수 있기를 기대해 본다.

References

- [1] I. P. Pavlov, *Conditioned Reflexes: An Investigation of the Physiological Activity of the Cerebral Cortex*. London: Oxford University Press, 1927, DOI: 10.1093/brain/51.1.129.
- [2] E. L. Thorndike, *Animal Intelligence: Experimental Studies*. New York: Macmillan Company, 1911, [Online], https://openlibrary.org/books/OL7172495/M/Animal_intelligence.
- [3] E. R. Kandel, "The molecular biology of memory: cAMP, PKA, CRE, CREB-1, CREB-2, and CPEB," *Mol. Brain*, vol. 5, no. 14, pp. 1-12, May, 2012, DOI: 10.1186/1756-6606-5-14.
- [4] W. Schultz, P. Dayan, and P. R. Montague, "A neural substrate of prediction and reward," *Science*, vol. 275, no. 5306, pp. 1593-1599, March, 1997, DOI: 10.1126/science.275.5306.1593.
- [5] R. S. Sutton and A. G. Barto, *Reinforcement Learning: An Introduction*. 2nd ed., Cambridge: The MIT Press, November, 2018, [Online], <https://web.stanford.edu/class/psych209/Readings/SuttonBartoIPRLBook2ndEd.pdf>.
- [6] K. Lorenz, "Der Kumpan in der Umwelt des Vogels," *J. Ornithol*, vol. 83, pp. 137-213, April, 1935, [Online], <http://klha.at/papers/1935-Kumpan.pdf>.
- [7] K. V. Frisch, *The Dance Language and Orientation of Bees*. Cambridge: Harvard University Press, January, 1993, [Online], <https://www.degruyter.com/document/doi/10.4159/harvard.9780674418776/html>
- [8] N. Tinbergen, "The Curious Behavior of the Stickleback," *Scientific American*, vol. 187, no. 6, pp. 22-27, December, 1952, [Online], <https://www.jstor.org/stable/24944080>.
- [9] D. Morris, *The Naked Ape*, New York: Dell Publishing, October, 1967, [Online], <https://folk.ntnu.no/krill/bioko-references/Morris%201967.pdf>
- [10] D. C. Blanchard and R. J. Blanchard, "Ethoexperimental approaches to the biology of emotion," *Annu. Rev. Psychol.*, vol. 39, pp. 43-68, February, 1988, DOI: 10.1146/annurev.ps.39.020188.000355.
- [11] B. A. Pellman and J. J. Kim, "What can ethobehavioral studies tell us about the brain's fear systems?," *Trends Neurosci.*, vol. 39, no. 6, pp. 420-431, June, 2016, DOI: 10.1016/j.tins.2016.04.001.
- [12] J. Halloy, G. Sempo, G. Caprari, C. Rivault, M. Asadpour, F. Tâche, I. Sâid, V. Durier, S. Canonge, J. M. Amé, C. Detrain, N. Correll, A. Martinoli, F. Mondada, R. Siegwart, and J. L. Deneubourg, "Social integration of robots into groups of cockroaches to control self-organized choices," *Science*, vol. 318, no. 5853, pp. 1155-1158, November, 2007, DOI: 10.1126/science.1144259.
- [13] J.-D. Choi and J. J. Kim, "Amygdala regulates risk of predation in rats foraging in a dynamic fear environment," *Proc Natl Acad Sci USA*, vol. 107, no. 50, pp. 21773-21777, December, 2010, DOI: 10.1073/pnas.1010079108.
- [14] W. G. Walter, "A machine that learns," *Scientific American*, vol. 184, no. 8, pp. 60-63, August, 1951, [Online], <https://www.scientificamerican.com/article/a-machine-that-learns/>.
- [15] R. Brooks, *Flesh and Machines: How Robots Will Change Us*. New York: Vintage Books, February, 2003, [Online], <https://www.semanticscholar.org/paper/Flesh-and-Machines%3A-How-Robots-Will-Change-Us-Brooks/8879847b07fac6fe93c39b7bb016b0fada227e4d#citing-papers>.
- [16] H. F. Harlow, "Affectional Response in the infant monkey," *Science*, vol.130, no.3373, pp.421-432, August, 1959, DOI: 10.1126/science.130.3373.421.
- [17] Q. Shi, H. Ishii, K. Tanaka, Y. Sugahara, A. Takanishi, S. Okabayashi, Q. Huang, and T. Fukuda, "Behavior modulation of rats to a robotic rat in multi-rat interaction," *Bioinspiration & biomimetics*, vol. 10, no. 5, 2015, DOI: 10.1088/1748-3190/10/5/056011

- [18] H. Ishii, Q. Shi, S. Fumino, S. Konno, S. Kinoshita, S. Okabayashi, N. Iida, H. Kimura, Y. Tahara, S. Shibata, and A. Takaniishi, "A novel method to develop an animal model of depression using a small mobile robot," *Advanced Robotics*, vol. 27, no. 1, pp. 61-69, 2012, DOI: 10.1080/01691864.2013.752319.
- [19] S. Butail, N. Abaid, S. Macri, and M. Porfiri, "Fish-Robot Interactions: Robot Fish in Animal Behavioral Studies," *Robot Fish*, pp. 359-377, May 2015, DOI: 10.1007/978-3-662-46870-8_12.
- [20] C. Spinello, Y. Yang, S. Macri, and M. Porfiri, "Zebrafish Adjust Their Behavior in Response to an Interactive Robotic Predator," *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 6, no. 38, May, 2019, DOI: 10.3389/frobt.2019.00038.
- [21] A. S. Rundus, D. H. Owings, S. S. Joshi, E. Chinn, and N. Giannini, "Ground squirrels use an infrared signal to deter rattlesnake predation," *National Academy of Sciences*, vol. 104, no. 36, pp. 14372-14376, 2007, DOI: 10.1073/pnas.0702599104.
- [22] J. Kim, C. Kim, H.-B. Han, C. J. Cho, W. Yeom, S. Q. Lee, and J. H. Choi, "A bird's-eye view of brain activity in socially interacting mice through mobile edge computing (MEC)," *Science Advances*, vol. 6, no. 49, 2020, DOI: 10.1126/sciadv.abb9841.
- [23] M. Davila-Ross, J. Hutchinson, J. L. Russell, J. Schaeffer, A. Billard, W. D. Hopkins, and K. A. Bard, "Triggering social interactions: chimpanzees respond to imitation by a humanoid robot and request responses from it," *Animal Cognition*, vol. 17, no. 3, pp. 589-595, May, 2014, DOI: 10.1007/s10071-013-0689-9.
- [24] P. M. Narins, D. S. Grabul, K. K. Soma, P. Gaucher, and W. Hödl, "Cross-modal integration in a dart-poison frog," *National Academy of Sciences*, vol. 102, no. 7, pp. 2425-2429, February, 2005, DOI: 10.1073/pnas.0406407102.
- [25] R. del A. Oritz, C. M. Contreras, A. G. Gutiérrez-Garcia, and F. M. González, "Social Interaction Test between a Rat and a Robot: A Pilot Study," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 13, no. 4, pp. 1-10, January, 2016, DOI: 10.5772/62015.
- [26] L. K. Quinn, L. P. Schuster, M. Aguilar-Rivera, J. Arnold, D. Ball, E. Gygi, J. Holt, D. J Lee, J. Taufatofua, J. Wiles, and A. A. Chiba, "When rats rescue robots," *Animal Behavior and Cognition*, vol. 5, no. 4, pp. 368-379, November, 2018, DOI: 10.26451/abc.05.04.04.2018.
- [27] E. de Margerie, S. Lumineau, C. Houdelier, and M.-R. Richard Yris, "Influence of a mobile robot on the spatial behaviour of quail chicks," *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 6, no. 3, September, 2011, DOI: 10.1088/1748-3182/6/3/034001.
- [28] A. Amir, S.-C. Lee, D. B. Headley, M. M. Herzallah, and D. Pare, "Amygdala Signaling during Foraging in a Hazardous Environment," *Journal of Neuroscience*, vol. 35, no. 38, pp. 12994-13005, November, 2015, DOI: 10.1523/JNEUROSCI.0407-15.2015.
- [29] J. H. Lee, S. Kimm, J. S. Han, and J. S. Choi, "Chasing as a model of psychogenic stress: characterization of physiological and behavioral responses," *Stress*, vol. 21, no. 4, pp. 323-332, July, 2018, DOI: 10.1080/10253890.2018.1455090.
- [30] S. Kimm and J.-S. Choi. "Sensory and motivational modulation of immediate and delayed defensive responses under dynamic threat," *J. Neurosci Methods*, vol. 307, pp. 84-94, September, 2018, DOI: 10.1016/j.jneumeth.2018.06.023.
- [31] T. Park and Y. Cha. "Soft mobile robot inspired by animal-like running motion," *Scientific Reports*, vol. 9, no. 14700, pp. 1-9, October, 2019, DOI: 10.1038/s41598-019-51308-4.



최준식

1989 서강대학교 생물학과(학사)
 1991 고려대학교 심리학과(석사)
 1999 Univ. of Massachusetts at Amherst,
 Neuroscience and Behavior(박사)
 2004~현재 고려대학교 교수

관심분야: Learning and Memory, Emotion Neuroscience, Robot Psychology