생물학 관점의 바이오로보틱스

김대은 (연세대학교)

Ⅰ. 서 론

바이오로보틱스는 생물학과 로보틱스의 융합 연구로 볼 수 있다. 이에 대한 다각도의 관점이 존재하지만, 흔히 로보틱스의 한 분야로 받아들여지는 경향이 있다. 해당 분야에 대한 전문 학회 활동은 최근 로봇 학회에서 주로 이루어지고 있다. 바이오로보틱스는 크게 두 부류로 나누어질 수 있다. 하나는 살아있는 생명체를 로봇으로 구현하여 해당 생명체의 운영 원리, 행동을 밝히고자 하는 분야와 생명체의 동작 원리를 모방하여 로봇 등의 응용 시스템을 구현하는 분야가 있다. 후자는 공학적인 관점에서 바이오로보틱스를 해석하는 것으로 이해할 수 있다. 생체 모방 공학 또는 생체 모방 로봇 등은 바로 이를 지칭하는 것으로 볼 수 있다. 전자의 관점은 생명체 또는 동물의 행동을 이해하려는 과학적 발견이라고 할 수 있다.

바이오로보틱스는 생물학, 생물행동학, 생물진화, 생체공학, 인지과학, 신경과학 등의 생명과학으로부터 얻은 영감과 지식을 모티브로 로보틱스에 접목하는 분야로 볼 수 있고, 동물의 센서 메카니즘, 운동 메카니즘, 신경 메카니즘, 신경 학습 이론을 이해하고, 이를 로봇의 움직임에 응용할 수 있다. 또한 로봇을 통한 시스템 모델이 동물의 행동 원리를 이해하는데 도움이 되고, 해당 시스템에 적합한 모델, 가설을 테스트하고 입증하는 도구로 사용되기도 한다. 본 논문에서는 이러한 바이오로보틱스 연구의 특징을 소개하고, 해당 배경과 그 연구 사례를 소개하려 한다.

Ⅱ. 바이로보틱스의 배경

바이오로보틱스 연구에 대한 관심은 최근 약 30년 전부터 증가하기 시작했다. 1980년대 MIT의 Brooks는 행동주의 로봇 (Behavior-based Robotics) 이라는 개념을 도입하였는데[1,2], 로봇 설계에 있어 새로운 패러다임을 제시하였다. 기존 로봇의 지향점은 지능 로봇의 실현을 목표로 하였고, 사고, 추론하는 지능적인 모습을 염두해 두었다. 그러나, 지식 표현 (Knowledge Representation), 계획 (Planning) 등의 고차원적인 인공지능의목표는 실제 환경에서 동작하는데 여러 가지 문제점을 노출해왔다. 소프트웨어적인 접근에서 컴퓨팅의 복잡도 증가, 주어진 환경 시스템의 불확실성, 유연성 있는 지식 표현의 한계 등 로봇 자율성에서 극복할 문제가 너무 많고, 실시간으로 로봇이 동작하기를 바라는 사용자의 기대와는 매우 다른 모습을 보여왔다. Brooks는 센서와 모터 사이에 작은 기본적인 행동에 대한 모듈을 두고, 이 행동 모듈의 조율을 통해 바라는 행동 양식을 이끌 수 있음을 보였다. 이를 통해서 실시간 동작하는 이동 로봇의 모습들을 선보였고, 실제 환경에서 운용될 수 있는 여지를 크게 넓혔다.

Brooks의 행동주의 로봇은 다른 형태의 지능 로봇을 의미했고, 이는 바이오로보틱스라는 새로운 분야와 그 틀을 같이 했다. 많은 생명체, 우리가 생각하는 단순하다고 생각하는 동물의 행동 양식은 주어진 환경에서 뛰어난 방식으로 적응하고 효율성 있는 방향을 제시하고 있다. 곤충처럼 뇌 구조가 포유류 만큼 복잡하지 않은 동물은 Brooks의 행동 기반 로봇의 움직임과 매우 흡사한 방식의 제어가 이루어지는 것처럼 보인다. 물론 동물은 뉴런 구조의 조직을 통해 센서와 모터의 연결이 이루어지고 있고, 이에 대한 구조와 기능이 완벽하게 이해되고 있지는 않지만, 여러 개의 행동 모듈이 존재하고, 주어진 환경의 변화 또는 센서 정보에 따라 해당 행동 모듈의 영향은 달라진다.

바이오로보틱스 연구가 로봇 학회에서 큰 관심 대상이 된

것도 오래되지 않았다. 지금 현재 생체모방로봇은 IROS, ICRA 로봇 학회에서 비약적으로 두각을 나타내는 주제이다. 바이오로보틱스에는 많은 연구 분야가 진행되고 있는데, 로봇의 관점에서 생물학적 영감을 토대로 응용 로봇의 개발에 초점이 맞추어져 있다.

이에는 선결과제로 동물 행동에 대한 이해, 동물 센서 또는 감각기관의 모방, 동물 모터 시스템과 그 동작 원리의 이해 등부터 시작되고 있다. 이에 대한 영감을 바탕으로 로봇 시스템에 응용되고 있다. 과연 왜 동물 시스템의 이해를 바탕으로 하고 있는 것일까? 그것은 로보틱스의 역사와 흐름 속에서 그 원인을 찾을 수 있을 것으로 본다. 특히 공학적 모델과 제어에 바탕을 둔 일반 로봇 제어는 운동학(kinematics), 역운동학 (inverse-kinematics), 동력학 (dynamics) 등에 기반을 둔 접근 방식이지만, 바이오로보틱스는 정형화된 접근 방식보다는 동물 센서, 모터, 연결 관계 등을 바탕으로 시스템에 대한 재해석을 시도하기도 한다. 이에 대한 수학적 모델은 또 다른 분석적(analytic) 접근 방식이 되고 있고, 동물 행동에 대한 나름 해석적 결론을 얻어낼 수 있다.

로봇의 역사에서 지능적 움직임은 로봇학자의 꿈과 도전의 대상이어 왔지만, 사람의 개념적 추상적 지능과는 아직은 거리가 멀다. 특히 기계가 인간의 바람을 대신하는 것은 아직은 요원하기만 하다. 가령 사람 대신 운전하는 로봇, 알아서 스케쥴 관리해주는 로봇, 대신 가사 일을 도와주는 로봇 등은 어떤 특징점을 갖고는 있지만, 우리의 기대 수준과는 다소 차이가 있다. 이에 대한 잠재적 문제는 환경에 대한 인지 과정과 환경에 대해 적응, 반응하는 시스템에서 본질적인 구조적 제약성이 있다고 볼 수 있다. 바이로보틱스 개념은 지능 로봇의 하나의 대안으로 인식되고 있다.

바이오로보틱스라는 주제로 로봇학회에서 휴머노이드 로봇에서 다족로봇에 이르기까지 다양한 형태의 관절 로봇, 특징적 기능을 갖춘 여러 동물 형태의 로봇 등 그 폭은 점차 증가 추세에 있다. 여기서 소개하는 바이오로보틱스의 대표적인 산물은 기존 로봇 학회에서 다루어오던 것과는 다소 다른 로봇 또는 연구를 소개하려고 한다.

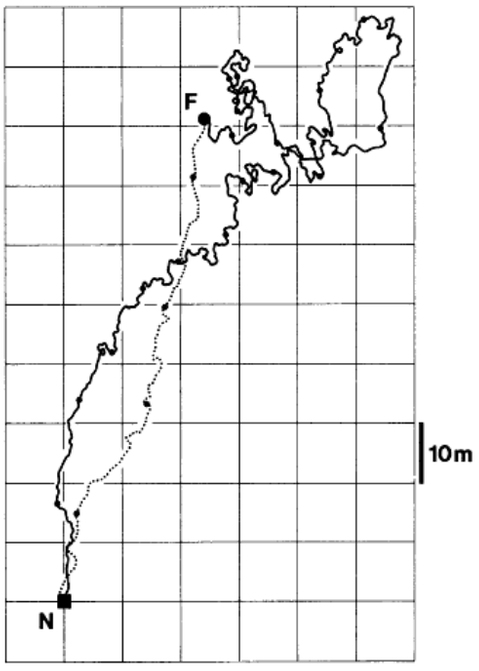
생물학적 영감을 바탕으로 동물 행동에 대한 원리에 대한 이해와 동물 생태에 대한 기여도를 찾을 수 있고, 공학적 응용도 고려하는 주제라고 할 수 있다. 그 중 하나는 네비게이션 주제로 사막개미의 특성과 관련 로봇을 소개하려 한다. 둘째로 촉각센서를 주제로 하는 쥐 수염 로봇을 소개한다. 셋째로 군집 특성을 갖는 로봇을 소개한다. 위에서 언급한 동물 행동과 관련 로봇은 로봇 학회에서는 그 주제가 선명하게 잘 드러나 있지 않은데, 기존 로봇 시스템과의 차별성이 큰 부분도 있고, 공학적 접근 방식에 비하여 해당 시스템의 효율성보다는 동물 생태적 해석과 움직임에 좀 더 초점이 맞추어져 있다고 볼 수 있다.

Ⅲ. 바이로보틱스 분야 사례

동물의 감각기관 센서를 모델로 하는 시스템, 동물의 운동기관을 모델로 하는 시스템, 동물의 행동 메카니즘을 모델로 하는 시스템 등 다각적인 분석이 가능한데, 감각기관 또는 운동기관을 모델로 하는 부분은 미세한 공정을 통하여 해당 시스템을 설계하는 부분이 많이 있다. 반면 동물의 행동을 모델로 하는 부분은 알고리즘적인 성격이 있어 소프트웨어적인 해석으로 다루어지는 경향이 있다. 동물 행동학 또는 행동 신경 생물학 분야는 동물의 행동 메카니즘에 대한 신경과학적인 설명과 접근을 다루기도 하는데, 그 동물 행동과 관련한 센서, 모터의 상호 작용에 초점을 맞추고 있다. 동물 뇌 구조 속에서 각종 뉴런 조직이 행동에 미치는 영향을 알기 어려운 관계로, 이에 대한 해석이 쉽지는 않다. 따라서, 거시적인 관점에서 동물 행동에 대한 가설을 로봇을 이용하여 검증하는 도구로 활용할 수 있는데, 로봇이 주어진 환경 속에서 해당 센서와 모터의 상호 작용을 통하여 주어진 행동 양식과 적응성을 보이는가를 확인할 수 있다.

위에 대한 사례로 먼저 사막 개미를 들 수 있다. 일반적인 집개미는 먹이를 찾은 후 자신의 집으로 돌아갈 때 페로몬이라는 화학물질을 이용하여 자신이 걸어온 길을 추적하여 집으로 돌아갈 수 있다. 사막 개미(Cataglyphis fortis)가 서식하는 곳은 햇볕이 강한 사막 환경으로 화학 물질을 이용한 길찾기는 유효한 방식이 되기가 어렵다. 〈그림 1〉에 나타난 것처럼 사막개미는 먹이를 찾기 위해 100-200m의 길을 떠나 랜덤하게 탐색을 하고, 일단 먹이를 찾은 후에는 바로 집으로의 최단 거리 방향으로 직접 돌아옴을 볼 수 있다. 자신이 걸어온 길과는 전혀 다를 뿐 아니라, 가장 효율적인 길의 선택을 한다는 점은 이 사막개미가 자신이 걸어간 경로를 모두 누적하여 계산하는 능력이 있다고 말할 수 있다. 최근의 발견에서는 사막개미는 자신이 걸어간 걸음 수를 계속 누적하는 것으로 알려져 있다. 사막개미가 어떤 방식으로 이를 계산하는지에 대하여는 많은 가설이 있지만, 경로 계산을 하는 뉴런 네트워크로 코딩이 되어있다고 보고 있다.

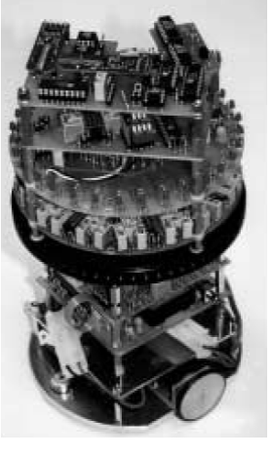
사막개미에게 또 다른 특성 중 하나는 집으로 귀환할 때, 집 근처에서 주변 지형지물을 사용한다는 점이다. 위에 언급한 경로 분석으로는 에러가 있기에, 비젼을 이용한 지형 지물 인식을 통하여 집을 정확히 찾을 수 있다. 어떤 방식으로 지형 지물을 인식하는가에 대한 많은 의견과 가설이 있는데, 로봇학자들은 이를 단순한 모델로 그 가능성을 확인했다. 그들의 모델은 개미가 집 주변에서 특징이 있는 지형지물의 전체



〈그림 1〉 사막개미의 궤적 (실선: 먹이 찾는 길, 점선: 집으로의 귀환 길, F: 먹이 찾은 곳, N: 집 위치) (reprinted from [3])

배치 관계를 기억하고 있다가, 집에서 떨어진 곳에서 인식한 지형 지물의 배치와 끊임없이 비교하여 집으로 돌아가는 방향을 결정한다는 것이다 [4~6]. 개미가 주변의 지형 지물을 이용하여 집의 위치를 찾는 것처럼, 〈그림 2〉에 본 로봇이 주변의 지형 이미지를 사용하여 집의 위치를 정확히 찾는 모습을 보여주었다 [6]. 결과적으로 이 실험을 통하여 개미의 집 귀환 과정에 대한 하나의 가설을 입증할 수 있었다.

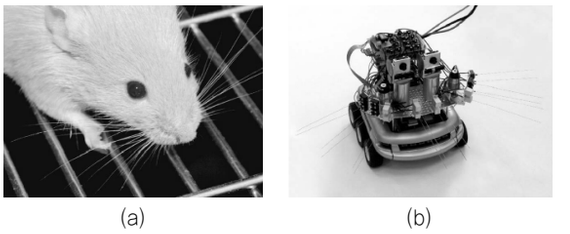
또 다른 바이오로봇의 사례로 쥐 수염 로봇을 들 수 있다. 쥐 수염은 많은 생물학자들에 의해 연구되는 주제인데, 쥐 수염은 촉수처럼 나와 있는 형태의 촉각 센서로, 다른 동물과 대비되는 점은 쥐가 이 수염 다발을 능동적으로 앞뒤로 움직



〈그림 2〉 사막개미를 모델로 한 이미지 이용한 네비게이션 로봇 (reprinted from [6])

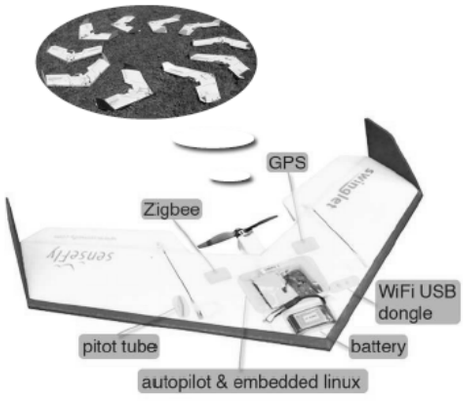
이면서 물체의 모양, 거칠기 등을 인식할 수 있다는 점이다. 마이크로미터의 거칠기도 구분할 수 있을 뿐 아니라, 다양한 물체의 모양 또한 인식할 수 있다. 이 쥐 수염에 대한 이론은 아직도 다양한데, 물체의 거칠기에 대한 의견은 크게 두 가지로 나뉜다. 한 이론에 따르면, 쥐 수염은 길이에 따라 서로 다른 고유 진동 주파수를 갖는데, 접촉하는 물체 거칠기에 따른 해당 진동 주파수와 비슷한 대역의 진동 주파수의 수염이 공진 현상이 나서, 쥐가 그 거칠기를 쉽게 파악할 수 있다는 주장이 있다. 또 다른 하나는 이 고유 진동 주파수와 관계없이 물체 표면의 패턴 (texture), 거칠기에 따른 진동이 그대로 수염을 통해 전달된다는 의견이 있다. 쥐 수염 센서를 모델로 한 인공적인 수염 센서를 제작하여 거칠기가 다른 사포 (sandpaper)에 대한 진동 실험을 하였을때, 수염 길이에 따른 고유 진동 주파수는 흔하게 관찰이 되는데, 이 진동 주파수는 접촉한 물체의 거칠기 자체에 대한 정보를 추출하는데 간섭이 되어 표면 패턴에 대한 순수 정보를 얻는데 도움이 되지 않음이 보여졌다 [7]. 그 실험은 수염 센서는 길이가 짧을수록 접촉하는 물체에 대한 표면 정보를 더 잘 얻을 수 있음을 보여주어서 고유 진동 주파수 가설보다는 순수 진동이 전달된다는 가설이 더 유효성이 있음을 밝히고 있다. 그리고, 물체의 모양을 인식하기 위해서는 각 물체까지의 거리 정보를 추출할 수 있어야 하는데, 수염이 물체에 닿을때 형성되는 수염의 구부러진 각도가 물체까지의 거리를 결정한다는 것이 보여졌다 [8]. 긴 수염은 결과적으로 물체의 거리를 인식하는데 유용한 센서로 보여지고, 각도의 시계열 정보가 물체의 모양을 결정하는 요소로 보인다 [8]. 〈그림 3〉에 있는 쥐 수염 바이오로봇은 물체를 인식하기 위해 사용된 로봇으로 위에서 언급한 생물학자들의 다양한 의견에 대한 하나의 가설을 뒷받침하고, 또 다른 의견을 제시하고 있다.

마지막 바이오로보틱스 사례로 군집 로봇을 들 수 있다. 새가 무리를 지어 나는 모습에 대하여 어떤 원리가 있는가에 의문이 있어왔는데, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해서 보여진 하나의 흥미로운 가설이 있다. 한 개체는 다른 개체와 특정 반경 내에 있어야 하고, 이웃 개체가 움직이는 방향을 따라서 같은 속도, 같은 방향을 유지하며 이동하고, 각 개체는 전체



(a) (b)

〈그림 3〉 쥐 수염센서를 모델로 하는 바이오로봇 (a) 쥐 수염 (b) 쥐 수염 모델 로봇 (reprinted from [8])



〈그림 4〉 군집 비행용 스웜 로봇 (reprinted from [10])

그룹의 중심점을 찾아가려는 성향이 있으며, 각 개체는 다른 개체와 일정 거리를 유지하려는 규칙을 적용할 수 있다. 이 때 새와 같이 군집을 이루며 장애물을 피해서 날 수 있음이 보여져 왔다 [9].

최근 〈그림 4〉에 있는 비행 로봇을 사용하여, 이러한 군집 이동에 대한 가설을 입증하였다 [10]. 위의 단순한 규칙들을 적용하였을때, 공중에서 가까운 이웃 로봇과 통신을 통하여 위치와 거리 정보를 얻고, 군집 대형을 유지할 수 있음이 실험적으로 보여졌다. 특히 군집 행동은 개체의 단순한 규칙에 의해서 쉽게 유발될 수 있는 면이 있고, 군집 로봇 등을 이용한 다양한 응용 가능성을 제시하고 있다. 위 비행 로봇 외에 그 밖에 많은 종류의 스웜 로봇 또는 비행 로봇이 있는데, 이에 대한 바이오로보틱스적인 접근들은 흔히 찾아볼 수 있다.

지금까지 본 세가지 사례들은 바이오로보틱스의 실생활 응용면에서도 충분히 가능성 있는 로봇으로 볼 수 있다. 네비게이션 로봇, 촉각 센서 로봇, 비행 편대 로봇 등은 공학적으로 응용 가능한 분야이다. 이와 더불어 위의 사례들이 시사하는 것은 생물학적 관점에 바이오로봇이 기존 생물학적 가설에 하나의 의견을 제시할 수 있다는 점이다. 때로는 생물학자가 찾지 못한 가설을 제시하거나, 기존 가설을 간접적으로 입증 또는 반증할 수 있다는 점에서 그 의미가 크다고 볼 수 있다. 결과적으로 생물학적 모티브를 이용한 로봇은 고전적인 인공지능 접근 또는 제어 방식과 차별화된 융합적 접근 방식을 제공하고 있고, 원초적인 지능의 요소를 설명할 수 있다고 본다. 더 본질적인 고급 지능에 대한 설명은 이와 같은 지능 요소를 바탕으로 가능하다고 본 저자는 주장하고 싶다.

Ⅳ. 결 론

바이오로보틱스 분야는 생명과학과 인공지능, 로봇의 융합적인 연구로 여러 분야에 대한 파급 효과가 있다. 한 분야의 전문성에서 답할 수 없는 의견을 제시하거나 입증할 수 있고, 공학적인 응용의 폭을 더 넓히고 있다고 말할 수 있다. 이러한 융합 연구는 로봇 분야에서 지능이라는 보편적 개념에 대하여 좀 더 구체적이고 세부적인 해결책을 제시할 뿐 아니라, 생명체의 적응성, 효율성, 내구성 등을 모방한 뛰어난 로봇의 설계에 도움을 줄 것이다.

참고문헌

[1] R.A. Brooks, “Robust Layered Control System for a Mobile Robot” IEEE Journal of Robotics and Automation, pp.14-23, 1986.

[2] R.A. Brooks, Cambrian Intelligence: The Early History of the New AI, Cambridge, MA, MIT Press, 1999.

[3] M. Mueller and R. Wehnder, “Path integration in desert ants, Cataglyphis fortis”, Proc. National Acad. Sci. USA, vol. 85, pp. 5287-5290, 1988

[4] D. Lambrinos, M. Maris, H. Kobayashi, T. Labhart, R. Pfeifer, R. Wehner, “In Autonomous Agent Navigating with a Polarized Light Compass” Adaptive Behavior, Vol.6, No.1, 131-161, 1997.

[5] D. Lambrinos, R. Möller, T. Labhart, R. Pfeifer, R. Wehner, “ mobile robot employing insect strategies for navigation” Robotics and Autonomous Systems, Vol.30, 2000, 39-64.

[6] R. Möller, “Insect Visual Homing Strategies in a Robot with Analog Processing” Biological Cybernetics, Vol.83, No.3, 2000, 231-243

[7] D. Kim and R. Möller, “A Biomimetic whisker for Texture Discrimination and Distance Estimation”, From Animalts to Animats 8, pp.140-149, MIT Press, 2004.

[8] D. Kim and R. Möller, “Biomimetic whiskers for shape recognition” Robotics and Autonomous Systems, Vol.55(3), pp.229-243, 2007.

[9] C. W. Reynolds, “Flocks, herds and schools: a distributed behavioral model,” in *SIGGRAPH Computer Graphics*, Vol.21. New York: ACM Press, 1987, pp.25–34.

[10] S. Hauert, S. Leven, M. Varga, F. Ruini, A. Cangelosi, J.-C. Zufferey, and D. Floreano, “Reynolds flocking in reality with fixed-wing robots: communication range vs. maximum turning rate”, Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, 2011.

김 대 은

1989년 서울대학교 컴퓨터공학과 학사.
1993년 University of Michigan, Ann Arbor, USA, Department of Electrical Engineering and Computer Science 석사.
2002년 University of Edinburgh, UK, Division of Informatics (Department of Artificial Intelligence) 박사.
2002년~2006년 Max Planck Institute for Human Cognitive and Brain Sciences, Munich, Germany.
2007년 3월~현재 연세대학교 전기전자공학부 조교수.
〈관심분야〉 바이로로보틱스, 인공지능, 행동신경생물학, 이동로봇