論 文

진화 연산을 이용한 손상에 강건한 로봇 자동 설계

Automated Design of Fault-Tolerant Robots using Evolutionary Computation

*김경중
(*Kyung-Joong Kim)

Abstract - Robots are one of the most advanced devices made by electronic circuits, mechanical body, and computer programs. In modern warfare, robots have played a key role in detecting hidden traps, searching for victims, and attacking enemies remotely. Because robots carry out their missions in unmanned situations, it is important to be fault-tolerant. In case of failure, the system has to maintain its performance as close as possible to the original one instead of losing its functions completely. It is necessary to build the robot's components as tolerant as possible to damages (known faults). Additionally, the robots need to deal with situations caused by unknown or unexpected failures. In this paper, we adopted evolutionary computation algorithms to design fault-tolerant robots automatically by minimizing the involvement of human experts. At first, the electronic circuits of robots was built by evolutionary computation with fault-tolerant properties. Secondly, robots guess the internal working mechanism of enemy robots by observing their behaviors. If it works successfully, the robots can predict the next action of the enemy robots and minimize damages from them. Evolutionary computation has been used to infer the hidden internal working mechanism (control systems) of enemy robots.

Key Words : Fault-Tolerant, Robots, Evolutionary Computation, Design, Automation

1. 서론

로봇을 설계하는 작업은 매우 많은 것을 고려해야 하기 때문에 복잡하다. 로봇의 몸체, 전자회로, 소프트웨어 등 여러 가지 요소가 유기적으로 결합되어야 하기 때문에 설계는 많은 전문가들의 협업이 필수적이다. 이러한 로봇을 고장에 강건하도록 만드는 것은 더욱 많은 노력을 필요로 한다. 물론, 손쉽게 동일한 기능을 수행하는 모듈을 하나이상 중복으로 설치하여 고장에 강건하도록 만드는 방법이 있기는 하다[1]. 하지만 이러한 방법은 많은 비용을 요구하고 각 모듈이 정상적으로 작동하는지 감시하는 추가 회로도 필요로 한다.

로봇을 고장에 강건하도록 설계하는 작업은 매우 높은 난이도를 요구하기 때문에 전문가들의 도움이 필수적이며, 때로는 전문가도 해결할 수 없는 경우가 있을 수 있다. 이러한 어려움을 해결하기 위해 기계학습을 이용한 자동 설계가 전문가를 보조하거나 혹은 전문가 없이도 설계를 진행할 수 있도록 한다. 진화 연산은 자연계의 진화현상을 모방한 기술로 탐색하려는 설계를 유전자 형태로 표현한 후 선택, 교차, 돌연변이 등의 유전 연산을 이용하여 최적의 결과를 발견한다[2]. 진화 연산은 해 공간이 넓은 문제에서 좋은 성능을 보이고 있어, 고장에 강건한 로봇을 설계하는 문제에 적용이 가능하다.

저자 소개
* 김 경 중 : 세종대학교 컴퓨터공학과 전임강사
kimkj@sejong.ac.kr

고장의 종류가 이미 알려져 있다면, 그 고장에 기능을 최대한 유지할 수 있는 새로운 회로를 설계하는 것이 필요하다. 이러한 방식의 접근을 수동적 고장허용이라고 부른다. 이와 달리, 고장의 형태를 미리 예상할 수 없는 경우엔, 고장이 발생했을 때 능동적으로 대처하는 것이 필요하며, 이러한 접근법을 능동적 고장허용이라고 부른다. 로봇은 기본적으로 수동적 고장허용과 능동적 고장허용 기술을 모두 갖추고 있어야 어떠한 종류의 고장에도 대처가 가능하다 (그림 1).

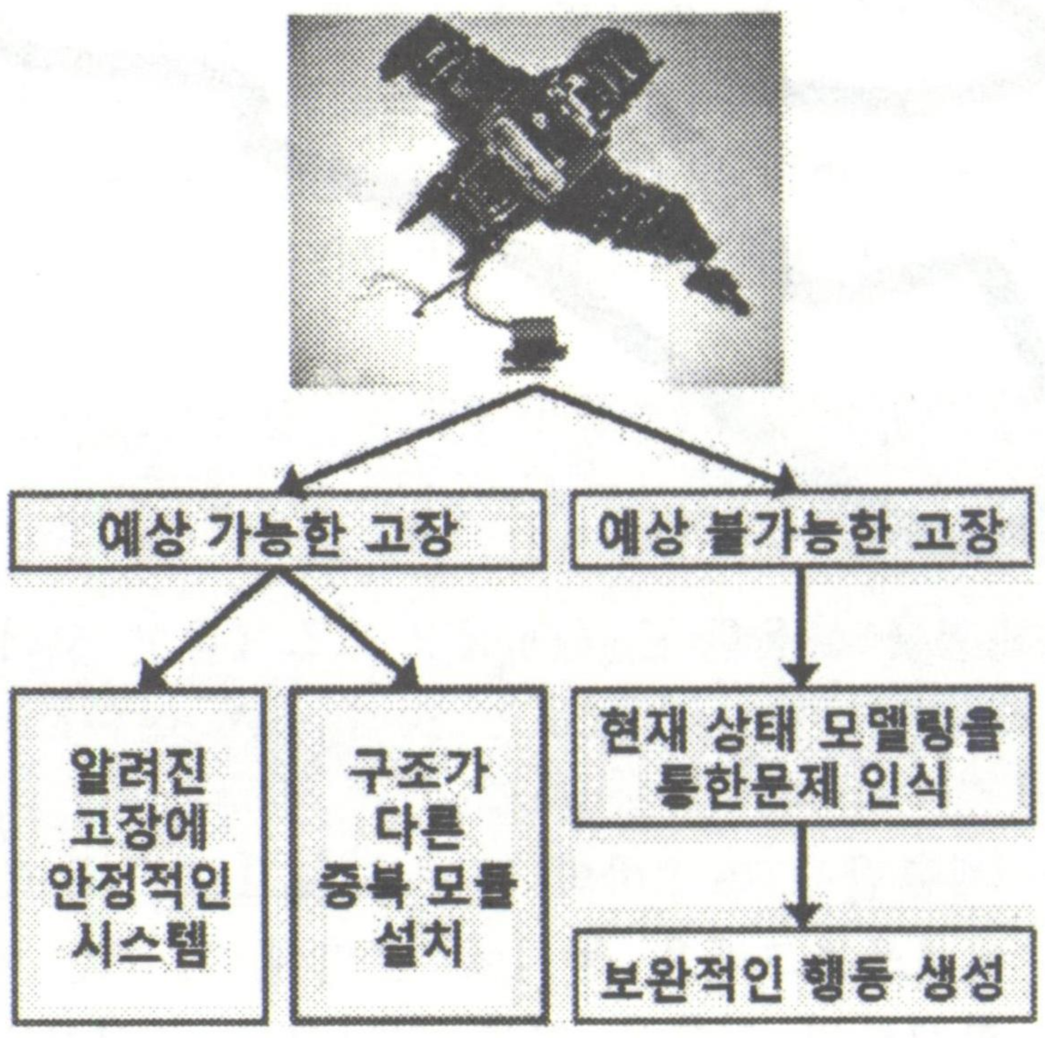

그림 1. 예상 가능한 고장과 예상 불가능한 고장에 대한 로봇의 대처방법

본 연구에선 로봇이 예상 가능한 고장과 예상 불가능한 고장에 모두 적절히 대처할 수 있는 방법으로 진화 연산을 사용하였다. 즉, 사전에 고장에 안정적인 회로를 설계하기 위해 진화 연산을 이용하였고, 또한 지속적으로 로봇에 피해를 주는 상대방 로봇의 전략을 간파할 수 있는 기능을 진화 연산으로 구성하였다. 이러한 방법을 통해 로봇은 사전에 알려진 고장에 안정적이면서, 예상하지 못한 적의 공격에도 안정적으로 대처할 수 있다.

2. 관련연구

로봇은 사람처럼 자신의 몸 상태에 대해 구체적으로 파악할 수 없기 때문에, 현재 발생한 문제를 정확히 인식하지 못하는 경우가 많다. 로봇의 내부에 사람과 유사한 복잡한 신경시스템을 설치해 주거나, 사람처럼 몸의 구석구석을 관찰할 수 있는 시각 시스템을 설치해 주는 것은 매우 많은 비용을 요구한다. 이러한 이유로 최소한의 센서정보만으로 현재 로봇의 상태를 파악하는 것이 필요하다.

Lipson은 기울기 센서 2개만을 가지고 있는 불가사리 형태의 로봇을 개발하여 적은 정보만으로 로봇이 현재 자신의 상태를 모델링할 수 있다는 것을 보였다[3]. 로봇은 지속적으로 움직이면서 자신의 현재 상태에 대한 정보를 수집하고 이를 토대로 자신의 몸에서 어떤 부분이 이상이 생겼는지를 판단한다. 만약 팔이 하나 망가졌다면, 센서정보는 정상일 때와 달라질 것이며, 센서정보를 가장 잘 설명할 수 있는 몸의 구조를 자동으로 탐색하면, 몸에서 어느 부분이 망가졌는지를 알 수 있다. 이러한 과정을 "자아 모델링"이라고 부르며, 로봇이 자기 자신의 생김새를 카메라나 외부의 도움 없이도 알아 낼 수 있음을 보였다.

진화 로봇 기술은 로봇의 제어기를 진화 연산을 이용하여 자동으로 설계하는 것으로, 로봇 설계자는 로봇이 이루어야 할 목표만 지정해 주면 된다[4]. 이러한 기술은 로봇의 행동을 일일이 프로그래머가 작성해 주어야 하는 어려움을 줄여준다. 또한, 로봇이 자신이 원래 사용하던 제어 프로그램이 정상적으로 작동하지 않는 고장 발생상황이 오더라도, 현재 문제 상황에 적합한 새로운 프로그램을 스스로 발견할 수 있음을 의미한다.

3. 고장에 강건한 로봇의 설계

3.1 고장에 강건한 로봇 회로의 설계

아날로그 회로를 설계하는 것은 전문지식을 요하는 일이며, 고장에 강건한 아날로그 회로를 설계하는 것은 더욱 어려운 일이다. 최근 들어 진화 연산을 이용한 회로 설계 기술이 많은 관심을 받고 있으며, 고장에 강건한 아날로그 회로도 설계하려는 시도가 이루어지고 있다. 하지만, 대부분 아날로그 컴포넌트의 완벽한 손상에만 집중하고 있을 뿐, 부분적인 작동 이상에 대한 고려는 불충분하다. 본 연구에선 아날로그 회로를 구성하는 요소들 (resistor, capacitor, inductor, transistor)이 부분적으로 손상한 경우에 성능을 안정적으로 유지하는 회로를 진화연산을 이용하여 자동으로 발견한다[5].

그림 2는 진화 연산을 이용하여 고장에 안정적인 회로를 설계하는 과정을 보여준다. 회로 20개를 임의로 생성한 후 돌연변이 (컴포넌트 추가 및 삭제, 파라미터 변경 등) 연산자를 이용하여 앞서 생성한 20개의 회로를 조금씩 변경한 새로운 회로 20개를 생성한다. 총 40개의 회로에 대해 고장에 안정적인 정도를 SPICE Simulator를 이용하여 평가한다. 모든 컴포넌트에 대해 한 번씩 고장을 일으켜 원래 성능과의 차이를 측정한다. 가장 크게 성능이 떨어지는 경우를 해당 회로의 Fault-Tolerance 기준으로 삼는다. 손상이 없는 경우에 사용자가 원래 의도한 기능을 충실히 수행하면서, 손상이 있는 경우에도 원래 기능을 최대한 유지할 수 있는 회로를 찾는 것을 목표로 한다.

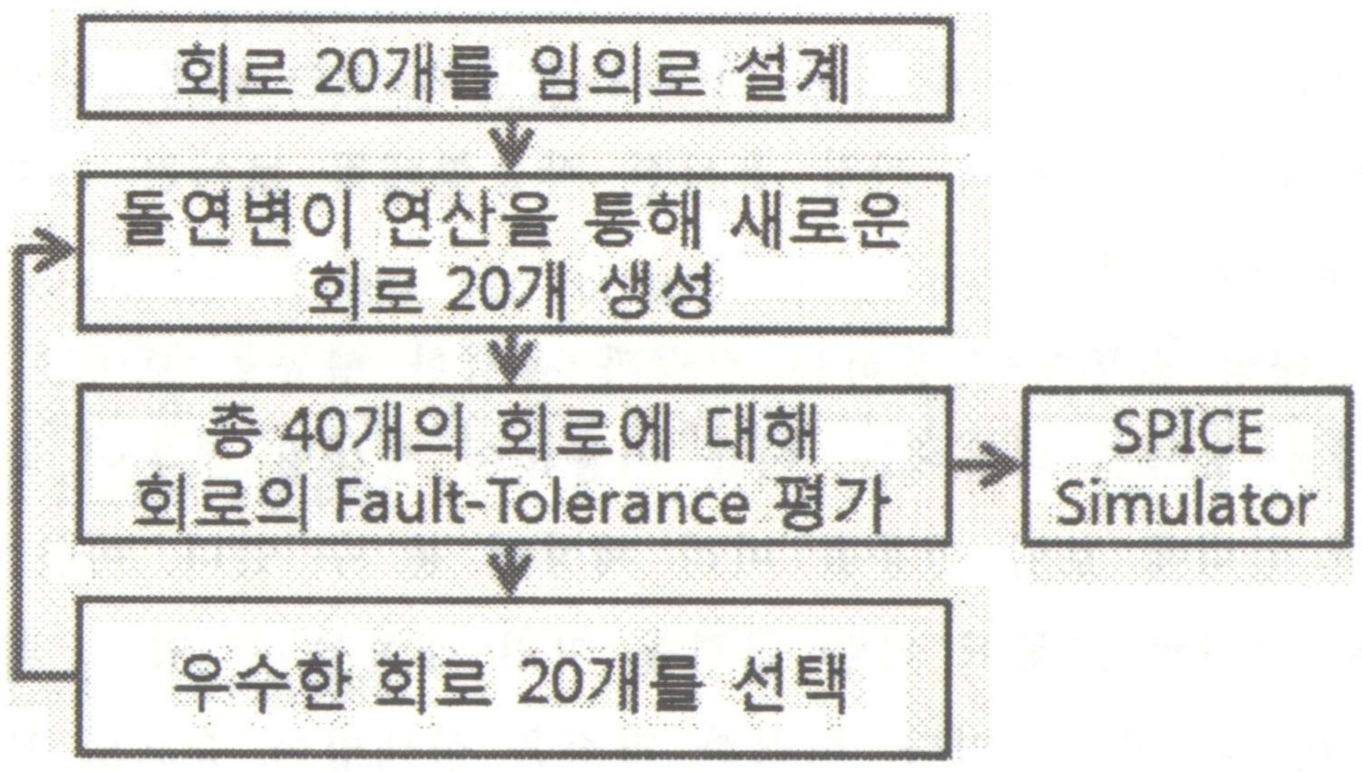

그림 2. 고장에 안정적인 회로의 자동 설계

일반적으로 회로 구성요소의 완벽한 손상을 주로 모델링하여왔지만, 본 연구에선 저항을 이용하여 해당 구성요소의 부분적인 손상도 모델링하였다. 회로를 이루고 있는 컴포넌트 중에서 손상을 입힐 것을 하나 택한 다음, 병렬로 저항을 연결하였다. 저항이 0이라면, 해당 컴포넌트는 전혀 작동하지 않을 것이다. 만약 저항이 무한대라면 해당 컴포넌트는 원래 기능을 100% 수행할 것이다. 이런 방식으로 저항의 크기를 조정하여 해당 컴포넌트가 손상 받은 정도를 시뮬레이션 하도록 하였다.

그림 5는 진화를 통해 설계한 Low-Pass Filter의 구조를 보여준다. 전체적으로 대칭 형태를 보여주고 있어, 특정 컴포넌트가 손상을 입더라도 전체적으로 안정적인 성능을 유지하도록 자동 설계가 이루어졌다.

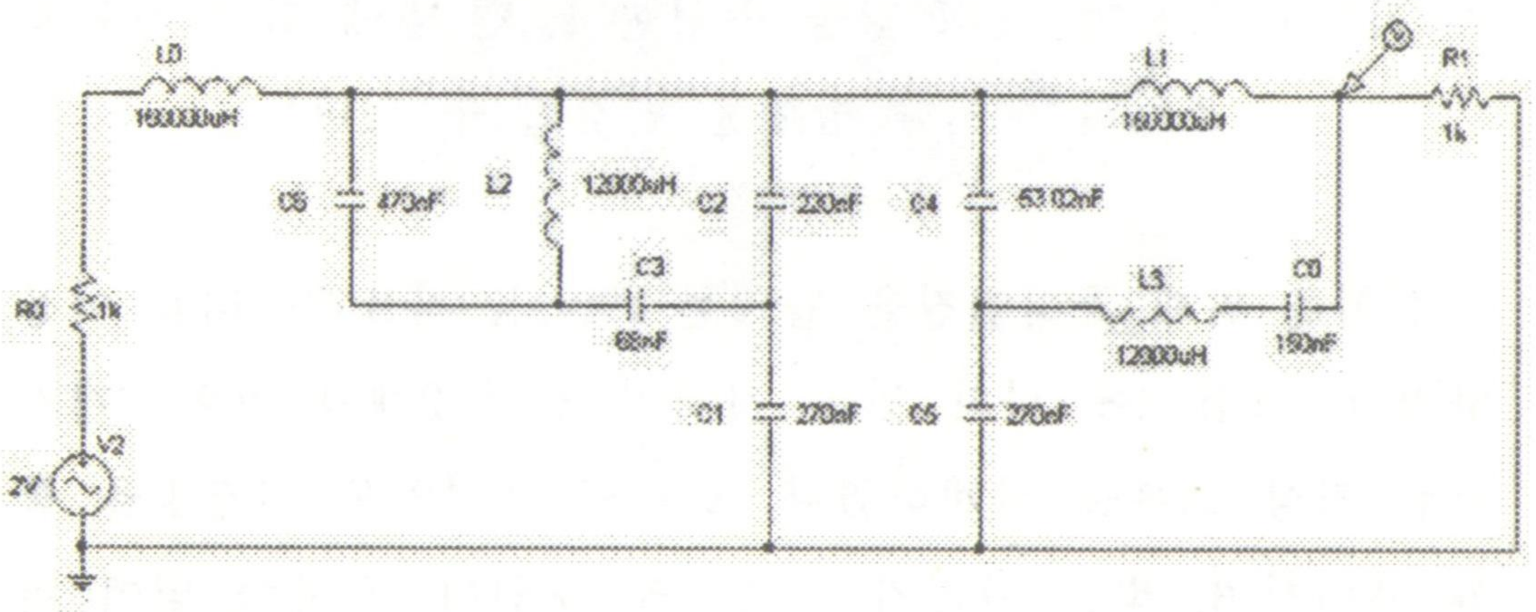

그림 3. 진화적으로 설계한 고장에 안정적인 회로[5]

3.2 적의 전략을 능동적으로 파악하여 고장을 최소화

사전에 예상이 가능한 고장이라면, 수동적으로 고장의 형태를 모델링하고 고장에 가장 안정적인 시스템을 기계학습을 통해 찾는 시도를 할 수 있다. 하지만 고장의 형태가 사전에 알려져 있지 않고, 적의 제어 시스템처럼 처음부터 비공개 형태인 경우라면, 다른 접근 방법이 필요하다.

본 연구에선 상대방 로봇의 움직임을 지속적으로 관찰하고

이를 토대로 상대방이 사용하고 있는 전략을 추측해 보는 방법을 제안한다. 상대방이 사용하는 가능한 전략의 개수가 매우 많기 때문에 넓은 해 공간을 탐색하는데 유리한 진화 연산을 활용하였다.

상대방 로봇의 움직임을 지속적으로 수집하여 이를 가장 잘 설명하는 모델을 진화 연산을 통해 탐색하였다. 상대방이 사용하는 전략을 표현하기 위한 모델로 신경망을 이용하였다. 즉 상대방 로봇이 입력받은 센서정보에 대해 반응하는 방식을 모니터링하고 이를 데이터 형태로 만든 다음, 상대방 로봇의 반응 패턴과 가장 유사한 작동형태를 보이는 신경망을 탐색하였다.

상대방 로봇이 사용하는 전략과 유사한 행동을 보이는 신경망을 찾아낸 다음에는, 이를 이용하여 상대방 로봇이 특정 센서 입력에 보일 반응을 미리 예상해 볼 수 있다. 이를 토대로 상대방 로봇이 가할 공격을 미리 대처할 수 있고, 피해도 최소화 할 수 있다. 이러한 과정은 상대방이 겉으로 보이는 행동만으로 내부에서 작동하는 제어기를 추측하는 것이기 때문에 일종의 역공학 (Reverse Engineering) 문제로 볼 수 있다. 본 연구에선 역공학 알고리즘 중에서 진화 연산에 기초한 EEA (Estimation-Exploration Algorithm)을 사용하였다 [6].

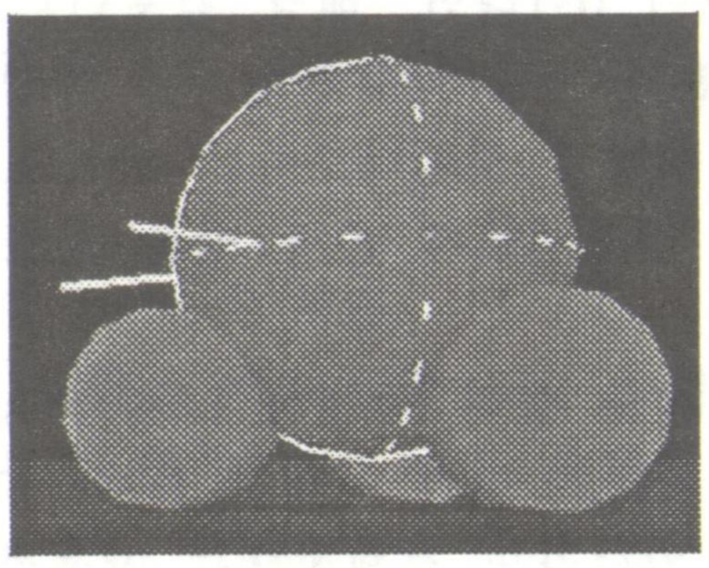

그림 4. 본 실험에서 사용한 단순한 가상 로봇 (센서를 두 개 가지고 있으며, 빛의 양을 측정한다. 맨 앞에 있는 바퀴를 조정하여 이동 방향을 변경할 수 있다)

실험을 위해 물리엔진을 탑재한 PhysX 시뮬레이터를 이용하였다. 그림 4에 나와 있는 것처럼 센서 2개와 바퀴 3개가 달린 가상 로봇을 설계하였다. 로봇의 움직임은 신경망을 통해 제어하며, 빛을 따라가는 행동을 보인다. 로봇이 빛에 반응하는 패턴을 데이터 형태로 수집한 후 이를 이용하여 해당 로봇이 사용하는 신경망 제어기를 역으로 추정한다.

그림 5는 진화연산을 이용하여 상대방 로봇이 빛을 따라간 움직임 데이터를 토대로 가장 유사한 결과를 보인 신경망을 찾은 후, 이를 이용하여 로봇의 움직임을 예측해본 결과이다. 그림에서 붉은 색 경로는 상대방 로봇이 움직인 것을 보여주며, 노란색 경로는 진화 연산을 통해 추정한 신경망을 이용하여 예측한 경로이다. 두 경로가 매우 유사한 패턴을 보이는 것을 확인할 수 있다.

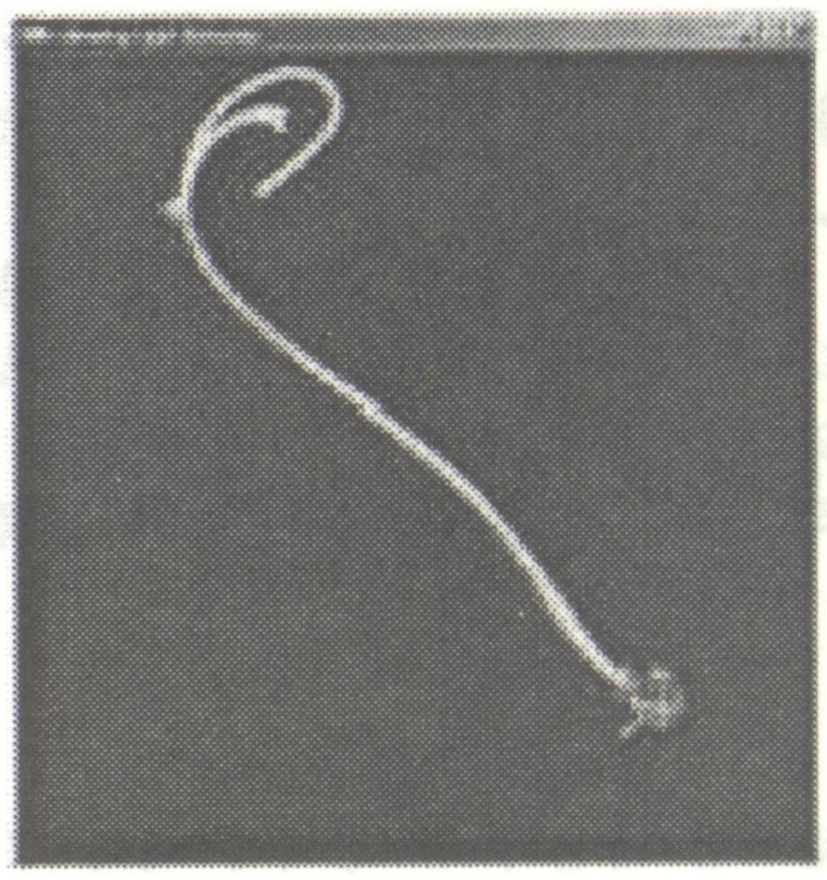

그림 5. 진화연산을 이용하여 추정한 로봇 제어기가 상대방 로봇의 움직임과 매우 유사한 행동을 보이는 것을 볼 수 있다. 붉은 색은 상대방 로봇의 움직임이고 노란색 선은 예측한 움직임이다.

4. 결론 및 향후연구

본 연구에선 로봇을 고장에 안정적으로 설계하기 위해 진화 연산을 활용하는 방법을 제안하였다. 사전에 발생할 수 있는 고장의 형태를 예상하고 고장에 안정적인 아날로그 회로를 자동으로 설계해 보았으며, 적의 공격에 안정적으로 피해를 최소화하기 위해 상대방 로봇이 사용하는 전략을 자동으로 발견하고 이를 이용하여 상대방 움직임을 예상하는 방법도 제안하였다. 본 실험을 통해 수동적 고장허용과 능동적 고장허용을 진화연산이라는 통합적인 방법으로 수행하는 방법을 보였으며, 향후 두 가지 고장허용기능을 통합하는 연구 수행을 진행할 계획이다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2010-0012876). 본 논문은 저자가 참여한 참고문헌 [5]와 [6]의 결과를 토대로 작성하였다.

참 고 문 헌

[1] R. Isermann, *Fault-diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*, 2006.

[2] D. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, 1989.

[3] J. Bongard, V. Zykov, and H. Lipson, "Resilient machines through continuous self-modeling," *Science*, vol. 314, no. 5802, pp. 1118-1121, 2006.

[4] S. Nolfi, and D. Floreano, *Evolutionary Robotics: The Biology, Intelligence, and Technology of Self-Organizing Machines*, 2000.

[5] K. -J. Kim, A. Wang, and H. Lipson, "Automated synthesis of resilient and tamper-evident analog circuits without a single point of failure," *Genetic Programming and Evolvable Machines*, vol. 11, no. 1, pp. 35-59, 2010.

[6] K.-J. Kim, and H. Lipson, "Towards a "theory of mind" in simulated robots," *Genetic and Evolutionary Computation Conference- Late Braking Papers*, pp. 2071-2076, 2009.