

생물학적 특성에 기반한 지능 제어 시스템의 구현 방안

On Implementation of a Biologizing Control System

*최병재, **Paul P. Wang

*: 대구대학교 전자정보공학부
bjchoi@daegu.ac.kr

** : Dept. of Electrical Eng., Duke University, USA

요 약

지식 정보화 사회의 도래와 함께 사람에게 친숙한 시스템의 개발에 관한 관심이 고조되고 있다. 아울러 인간 게놈 프로젝트를 통한 사람의 유전학적 특징을 분석하는 분야의 연구가 활성화되고 있다. 본 논문에서는 사람의 유전자 거동 특성이 가진 여러 가지의 다양한 특성이 새로운 지능 알고리즘의 구현을 위한 기본 원리로 사용될 수 있음을 제시한다. 이를 위하여 유전자 동조에 널리 사용되고 있는 불리언 네트워크 모델을 포함하여 생물학과 제어공학의 접목에 관하여 설명한다. 또한 불리언 네트워크를 기반으로 발표된 SORE (Self Organization and Regulating Engine) 시스템의 다양한 특징들이 자동제어 분야에 적용될 수 있음을 보인다. 본 논문의 범위는 구체적인 적용 예를 제시하는 정도는 아니며, 단지 그 가능성에 관해서만 제안하고자 한다.

1. 서론

최근 바이오 제어 시스템에 관한 연구가 제어 분야에서 매우 중요한 문제의 하나로 취급되고 있으며, 이를 계기로 인간의 생물학적 특성을 이용하여 시스템의 성능을 향상시키기 위한 연구가 활성화되고 있다. 이를 뒷받침하기 위하여 James Albus와 같은 선구자적인 연구자들은 마인드 공학 (engineering of mind)을 위한 로드맵 구축에 관한 연구 결과를 발표하였다[2,3].

바이오 제어 시스템을 위한 시스템 구조는 매우 복잡한 계층적 구조를 가질 것이다. 그렇다면 바이오 제어 시스템을 동작시키는 시스템의 구성 요소는 무엇일까? 모든 것이 분명하지는 않지만, 오늘날 널리 연구되고 있는 불리언 네트워크 혹은 셀룰라 오토마타가 그 하나의 실마리를 제공해 줄 수 있을 것이다.

불리언 네트워크는 1969년 Stuart A. Kauffman에 의해 처음으로 소개되었다[4]. 불리

언 네트워크는 NK-네트워크라고도 불리며, 최근에는 생물학적 유전자 네트워크에서 핵심 이론으로 사용되고 있다.

지난 50여년 이상 계속되어 온 제어 이론에 관한 연구는 고전 제어 알고리즘에서 현대 제어 알고리즘에 이르기까지 상당히 많은 새로운 알고리즘을 제시하였고, 이들의 일부는 이미 다양한 형태로 산업 현장에서 실제로 적용되고 있다. "Biologizing control theory: How to make a control system come alive"[5]에서는 제어 공학자들을 위한 일차적인 관심의 주제로써 신뢰성 (reliability)과 생존성 (survivability)을 강조하였고, 이를 위하여 "biologizing"이라는 새로운 단어를 사용하였다. 즉, 제어 시스템 설계에 대한 새로운 하나의 가치 판단 기준을 제시하고 있다. 아울러 지난 20여년전인 1986년 가을에 Santa Clara 대학에서 개최된 "Challenges to Control"에서 25명의 전문가로 구성된 최고위 패널 (blue-ribbon panel)에서조차 제어 공학자들 앞에

놓인 여러 가지 문제점과 대책을 제시하는 과정에서 “biology”와 “control”의 조합에 대하여 강조하였다[6].

제어 이론에 널리 활용되고 있는 “폐환(feedback)”의 개념 또한 사람의 신체 내부의 체온 및 화학적 성분 등의 균형을 조절하는 기능인 항상성(homeostasis)의 특별한 경우로 알려져 있다[7]. 그러나 불행하게도 이러한 간단한 경우에 근거한 일반화를 제시하는 것조차도 그렇게 쉬운 일이 아니다. 그럼에도 불구하고 바이오 제어 시스템에 관한 연구는 제어 분야에서 매우 중요한 문제로 취급되어야만 한다.

본 논문에서는 유전자 거동 특성인 자기 조직화 및 자기 동조의 특성을 불리언 네트워크의 이론으로 표현하고, 여기서 얻을 수 있는 지능 알고리즘 구현을 분석하고, 그 결과를 토대로 새로운 지능형 알고리즘의 체계화 가능성에 관하여 기술한다.

2. 제어 언어로서의 불리언 네트워크

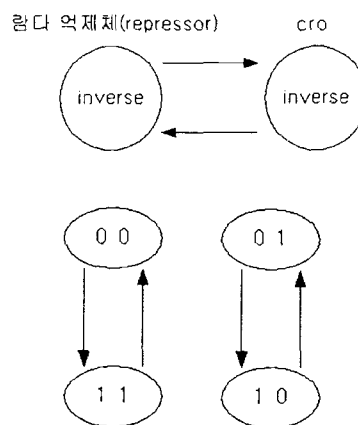
유전자 동조를 위한 모델링에 널리 사용되고 있는 이론은 Stuart A. Kauffman이 제안한 불리언 네트워크이다[4,8]. 이것은 Kauffman의 NK-네트워크라고도 불린다. 여기서 N은 유전자의 전체 수를 나타내고, K는 불리언 네트워크의 최대 연결성(maximum connectivity), 즉 각 노드의 입력의 수를 나타낸다.

불리언 네트워크는 보통 $G(V, F)$ 로 나타내며, $V = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 는 유전자 집합을 의미하고, $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ 는 불리언 함수 리스트를 의미한다. $x_i \in \{0, 1\}$ 는 이진 변수이고, $i = 1, 2, \dots, n$ 이다. $t+1$ 순간의 x_i 의 값은 t 순간의 다른 유전자들의 값과 불리언 함수 $f_i \in F$ 에 의해 결정된다. i 번째 유전자의 상태 혹은 발현을 나타내는 x_i 의 값이 1이면, 그 유전자의 형질은 발현되었음을 의미하고, 0이면 그 유전자의 형질은 발현되지 않았음을 의미한다. 불리언 함수 리스트인 F 는 유전자들 사이의 상호작용에 의한 동조 규칙을 의미한다. 그리고 모든 유전자들은 그들 각각에 할당된 함수에 의해 동기적으로 갱신된다. 불리언 네트워크의 각 상태는 원으로 표시하며, 함수에 따른 네트워크의 변화는 상태들 사이의 화살표로 표시한다.

유전자 동조에 사용되는 불리언 네트워크는 기호화된 논리 함수를 가지며, 이들 논리 함수는 완전 집합을 형성하는 논리 연결자인 AND, OR, NOT으로 표현된다. 불리언 네트워크의 다음 상

태는 논리 연결자와 불리언 변수로 구성되는 불리언 함수에 의하여 결정되고, 상태의 순서는 리미트 사이클(limit cycle)이나 어트랙터(attractor)로 수렴하게 된다.

하나의 예로써, 람다 박테리오파지(Lambda bacteriophage)에서 유전자 발현을 나타내는 불리언 네트워크 모델을 그림으로 표현하면 [그림 1]과 같다.



[그림 1] 람다 박테리오파지의 불리언 네트워크 모델

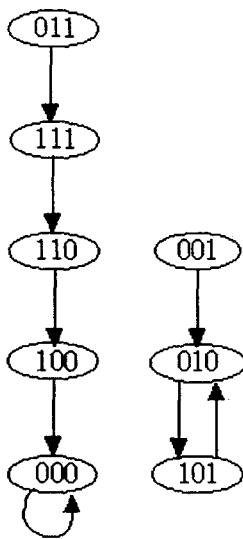
[그림1]은 2개의 노드(유전자)를 가지는 단일 입력 불리언 네트워크 모델이다. 그림에서 알 수 있듯이 람다 억제체는 cro 발현을 억제하고, 그 반대로 cro 또한 람다 억제체의 발현을 제지한다. 따라서 두 노드는 모두 역(inverse)의 동작 특성을 보인다. 그러므로 [그림 1]에서 보이듯이 람다 박테리오파지는 두 개의 리미트 사이클을 가지는 특성을 보인다.

불리언 네트워크와 셀룰러 오토마타 등은 상태 공간 개념을 사용하는 현대 제어 이론으로 잘 설명될 수 있다. N 개의 유전자들은 벡터 공간에서 $N \times 1$ 상태 벡터로 표현되고, 이것은 이산 상태공간에서 정확히 2^N 개의 상태 벡터들로 구성된다. 상태 벡터 공간은 I 개의 독립적인 서브 공간 $\{S_1, S_2, \dots, S_I\}$ 로 분리될 수 있다. 여기서 I는 어트랙터 혹은 리미트 사이클의 전체 수이다. 만약 α_S 와 α_{S_k} 를 각각 서브 공간 S_j 및 S_k 의 구성 요소라고 하면, $j \neq k$ 에서 $\alpha_{S_j} \cap \alpha_{S_k} = \emptyset$ 이고 $S_j \cap S_k = \emptyset$ 이다. 서브 공간을 나타내는 서브 그래프들은 고립된 섬(isolated island)들로 “basin of attractors”를 형성한다.

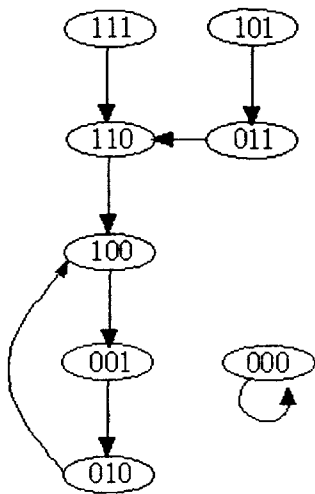
3. 군체 형성 개념

혼돈 질서의 복잡성은 불리언 논리의 규칙들에 존재하는 시변 특성에 기인하지만, 모든 복잡성은 자율 동작으로 인하여 유발된다고 볼 수 있다. 여기서는 영상태 응답 (zero-state response)의 형태가 존재하지는 않지만, “군체 형성 (colonization)”으로 불리는 동적 시스템의 확장이라는 등가 형태로 나타난다.

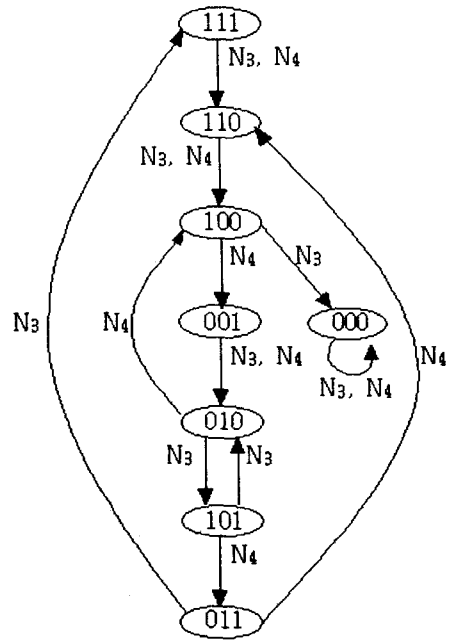
[그림 2]로부터 유전자 네트워크에 새로운 유전자가 추가되면 더 큰 규모의 네트워크가 등장하게 된다는 사실을 알 수 있다.



(a) A 3-gene network N_3



(b) A 3-gene network N_4



(c) Serial cascade of N_3 and N_4

[그림 2] 3개의 유전자로 구성된 임의의 두 네트워크와 이들의 직렬 결합

3개의 유전자로 구성된 두 개의 유전자 네트워크를 각각 N_3 ([그림 2] (a))와 N_4 ([그림 2] (b))라고 가정하자. 이들은 둘 다 단지 하나의 어트랙터만을 가지고 있다. 그러나 이들을 직렬 결합 (serial cascade)하면 [그림 2] (c)를 얻을 수 있으며, 이를 통하여 그 동작 특성이 크게 변하게 되었음을 알 수 있다. 특별한 의미를 가지는 리미트 사이클의 수가 다섯 개 이상으로 늘었으며, Stuart A. Kauffman은 이들을 “혼돈의 가장자리 (edge of chaos)”라고 하였다.

다른 예로써 4개의 유전자로 구성된 네트워크 N_4 와 5개의 유전자로 구성된 네트워크 N_5 에 하나의 새로운 유전자를 추가하면 10개의 유전자로 구성되는 네트워크 N_{10} 의 대형 유전자 네트워크가 만들어질 수도 있다. 이렇게 만들어지는 새로운 유전자 네트워크는 2^{10} 개의 상태 벡터를 가지게 되고, 그 규모는 4개의 유전자로 구성된 N_4 및 N_5 의 경우에 비하여 훨씬 크게 된다. 이렇게 유전자 하나가 차지하는 중요성이 큰 이유는 하나의 유전자는 대규모 분자들의 조합일 뿐만 아니라 유전자 하나에는 온도, 압력 등의 화학적 변화에 대한 정보를 내포하고 있기 때문이다 [9].

4. 생물학적 지능 시스템을 위한 기타 특성

바이오 제어 시스템 분야에서 최우선 과제로 고려되는 사항으로 신뢰성과 생존성을 들 수 있다. 그러나 불리언 네트워크는 일반적으로 $K < N$ 의 제한 사항을 가진다. 즉, Stuart A. Kauffman의 이론에 따르면, 생물학적인 모델에서 K 는 N 에 비하여 작은 값을 가진다고 명시하였다. 불리언 네트워크가 가진 이러한 문제점을 해결한 가장 일반적인 네트워크의 구조로써, Paul P. Wang 등은 SORE를 제시하였다[1]. SORE는 불리언 네트워크에서 $N = K$ 인 상태를 허용한다. Wang 교수의 실험실에서 연구되고 있는 중간 결과에 의하면 SORE는 잉여 특성 (redundancy characteristics)을 가지고 있으며, 이것은 바이오 제어 시스템 설계에서 요구되는 일종의 신뢰성 및 생존성의 특성을 가지게 만드는 요인이기도 하다.

유전자 거동 특성이 가진 기능으로 자기 조직화와 자기 동조가 있으며, 이것은 생물학적 특성에 기반한 제어 시스템 (biologizing control system)의 기본 요구사항의 하나이다.

유전자 거동 특성을 나타내는데 널리 사용되고 있는 불리언 네트워크는 물론 SORE 또한 강력한 분류 기능을 가지고 있다. 분류 혹은 패턴 인식 분야에서 가장 중요한 문제의 하나는 어떤 형태의 구조를 가지는 데이터라 하더라도 정확하게 인식해내는 비율인데, 이런 점에서 SVM (Support Vector Machine)과 ANN (Artificial Neural Network)을 들 수 있으나, 이들은 모두 유전자 거동 특성 모델의 능력에는 미치지 못하는 것으로 입증되고 있다. 극단적인 예로써, SORE의 가장 간단한 구성 예인 2개의 유전자로 구성된 네트워크조차 어떤 종류의 데이터 구조에 대해서도 최상의 분류 기능을 발휘한다고 발표하였다[10]. 분류 기능은 지능 제어 시스템은 물론 자율 제어 시스템의 핵심이며, SORE의 이러한 분류 능력으로부터 유전자의 거동 특성은 생물학적 제어 시스템의 핵심 요소로 사용할 수 있을 것이다.

퍼지논리 이론의 근사추론이 가지는 결정 (decision) 능력은 유전자 거동 특성 모델이 가진 기능의 하나로 생각할 수 있다. 불리언 네트워크에 사용된 불리언 논리는 각각의 노드 혹은 유전자가 논리 연결자의 어떠한 조합을 취할 수 있도록 만들어진다. 퍼지 논리의 방법론에서 지금까지 채택된 규칙은 모두 "IF ..., THEN ..." 의 단순한 구조이며, 이것은 유전자 거동 특성 모델

의 특별한 경우에 지나지 않는다. 즉, 유전자 거동 특성 모델에서는 훨씬 더 복잡한 형태의 규칙을 사용하는 것을 허용하고 있다.

적응과 학습 또한 생물학적 제어 시스템의 기본 요구사항 중의 하나이며, 이러한 특성을 가진 ANN 혹은 퍼지논리 이론이 유전자 거동 특성 모델에 의해 실현될 수 있다는 점에서 유전자 거동 특성 모델에 의해서도 적응과 학습 기능을 쉽게 구현할 수 있을 것이다.

5. 결론

지능형 로봇, 장애인을 위한 재활 및 보조 기구 등 사람에게 친숙한 시스템 (human friendly system)의 개발을 요구하는 분야가 증대되고 있다. 여기서는 새로운 지능형 알고리즘의 구현 및 체계화 가능성을 위한 이론의 하나로 유전자 거동 특성을 제안하였다. 즉, 유전자의 동조 및 자기 조직화 특성과 유전자의 거동을 분석하는 도구로 널리 사용되고 있는 불리언 네트워크에 대한 이론을 통하여 생물학적 특성에 기반한 새로운 지능 알고리즘이 구현될 수 있음을 보였다. 추후 과제로는 제시한 아이디어의 유용성을 입증하기 위하여 구체화된 적용 예를 제시할 예정이다.

6. 참고문헌

- [1] Wang, Paul P. and Heng Da Cheng. SORE: Self Organizable and Regulating Engine. A research proposal submitted to U.S. NSF. Feb. 20, 2003. File number 03248 27, Fastlane.
- [2] J. S. Albus, Outline for a theory of intelligence, IEEE Trans. SMC 21(3), 1991
- [3] J. S. Albus, The engineering of mind, Information Sciences 117, 1999
- [4] S. A. Kauffman, Metabolic stability and epigenesis in randomly connected nets. *J. Theoret. Biol.*, 22, 1969
- [5] J. L. Casti, "Biologizing" control theory: How to make a control system come alive, Complexity 7(4), 2002
- [6] Report of the workshop Held at the University of Santa Clara on September 18-19, 1986. Challenges to control: A collective view, IEEE Trans. Automatic Control 32(4), 1987
- [7] W. B. Cannon, The wisdom of the body, W. W. Norton and Co., New York, 1939
- [8] S. A. Kauffman, *The Origins of Order. Self-Organization, and Selection in Evolution.* Oxford University Press, 1993
- [9] T. E. Ideker *et al.*, Discovery of regulatory interactions through perturbation: inference and experiment design, Pacific Symposium on Biocomputing, 5, 2000
- [10] Paul P. Wang and Jing Yu. SORE. Self Organizable and Regulating Engine - A Powerful Classifier, *Proceedings of 7th Joint Conf. on Information Science*, Sep. 26-30, 2003