

Genetic Programming 기반 플랜트/제어기 동시 최적화 방법

Genetic Programming Based Plant/Controller Simultaneous Optimization Methodology

서 기 성*
(Kisung Seo)

Abstract - This paper presents a methodology based on evolutionary optimization for simultaneously optimizing design parameters of controller and components of plant. Genetic programming(GP) based bond graph model generation is adopted to open-ended search for the plant. Also GP is applied to represent the controller with a unified method. The formulations of simultaneous plant-controller design optimization problem and the description of solution techniques based on bond graph are derived. A feasible solutions for a plant/controller design using the simultaneous optimization methodology is illustrated.

Key Words : Plant/Controller simultaneous optimization, Bond graph, State equation, Genetic programming

1. 서 론

플랜트와 제어기는 서로 밀접한 상호작용을 하기 때문에, 고성능을 얻기 위해서는 플랜트/제어기의 동시 최적화가 고려되어야 한다. 그러나 이러한 방식은 탐색공간이 방대하고, 일관된 방법론이 필요하기 때문에 매우 어려운 문제이다[1].

플랜트를 구성하는 요소가 복잡할수록 플랜트의 구성 비용이 증가하고, 이에 대한 제어가 더 어렵기 때문에, 일부 분야를 제외하고는 필요성이 높지 않았다. 그러나 H/W 및 컴퓨팅 비용이 상대적으로 내려가는 추세라, 고성능 시스템을 구성하기 위해서는 플랜트와 제어기에 대한 동시 최적화가 유력한 수단이 될 수 있다. 기존에는 플랜트와 제어기의 분리 설계가 대부분이었고, 분야에 따라 플랜트와 제어기를 함께 고려한 시도가 있어 왔으나 순차적인 적용이나[2], 제한된 몇 개의 파라미터만을 대상으로 한 연구이다[1].

본 연구에서는 이러한 제한 상황을 확장하여, 플랜트에 대해서 임의의 열린 구성요소의 조합이 가능하게 함을 목표로 한다. 한편, 본드 그래프를 이용한 복합 에너지 도메인에 적용할 수 있는 설계 방법과 GP(Genetic programming) 진화연산을 사용하여 본드 그래프 모델을 생성하는 연구가 본 연구자에 의해 진행되어 왔다[3,4]. 이에 기반하여, 플랜트는 복합 에너지 도메인에 대해서 공통적으로 적용할 수 있는 본드 그래프를 사용하여 구조 및 파라미터의 제한이 없는 최적화 문제로 정의한다. 제어기는 PID 방식을 사용하고, PID 계수가 최적화 대상 변수이다.

제어기와 플랜트의 동시 진화적 최적화를 위하여, 통합한 상태 방정식 해석과정을 도출하고, GP를 사용하여 제한이 없는 플랜트

/제어기에 대한 동시 최적화 방법론을 제안한다.

2. 플랜트/제어기 동시 최적화

2.1 문제 정의

그림 1에 전형적인 플랜트와 제어기 구조가 나와 있으며, 이들의 최적화 문제는 다음과 같이 구분된다.

- 1) 플랜트가 고정되고, 제어기를 최적화
- 2) 제어기가 고정되고, 플랜트를 최적화
- 3) 플랜트와 제어기를 동시 최적화

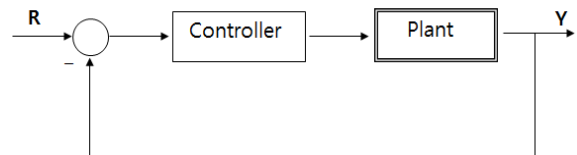


그림 1 플랜트/제어기 구조

Fig. 1 Structure of plant/controller

1)의 접근은 전형적이고, 실제 널리 적용되는 방법이다. 2)의 경우는 필요성이나 기대효과가 크지 않아서 거의 적용이 안 되고 있다. 3)의 문제는 매우 난이도가 복잡한 문제로, 현재까지는 거의 시도가 되고 있지 않지만, 향후에는 고도의 정교한 시스템에 점차 적용이 될 것으로 기대된다.

2.2 제어기의 설계 및 최적화

제어기의 최적화는 제어 요소를 임의의 조합으로 구성하는 경

* Corresponding Author : Dept. of Electronics Engineering, Seokyeong University, Korea.

E-mail : ksseo@skuniv.ac.kr

Received : November 10, 2016; Accepted : November 16, 2016

우도 가능하나, 단일 입출력 문제에 대해서는 PID 제어기의 계수를 최적화하는 방식이 널리 쓰이고 있으며, 성능 측면에서도 만족스런 수준이다. 따라서 제어기만의 최적화는 PID 실수 계수(파라미터)의 최적화에 해당하며, 비교적 난이도가 높지 않은 편이다. 그림 2는 PID 제어구조를 나타내며, 여기서 계수 K_1 , K_2 , K_3 를 결정하는 문제이다.

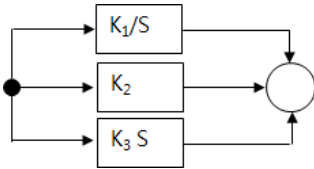


그림 2 PID 제어기 구조
Fig. 2 PID controller

2.3 플랜트의 설계 및 최적화

플랜트(Plant)는 제어시스템에서 제어하고자 하는 물리적 대상을 뜻하며, 전동기, 로봇, HDD, 냉난방 공기조, 온도 제어시스템, 자동차 현가장치, 그리고, 정유, 철강등의 대규모 설비시스템도 포함한다.

플랜트를 설계할 때, 대부분 구조가 고정된 제한 조건에서 적합한 파라미터를 결정하는 방식을 취한다. 기존의 플랜트를 일부 수정하여 성능을 개선하는 경우도 일반적이다. 그러나 이러한 전통적인 설계 방법 대신에 구조를 제한하지 않은 상태에서 자유로운 구성 요소의 조합을 통한 플랜트의 설계가 향후 대두될 전망이다. 구성 요소의 수와 연결 관계가 열린 여러 회로에 대한 예가 그림 3에 나와 있다.

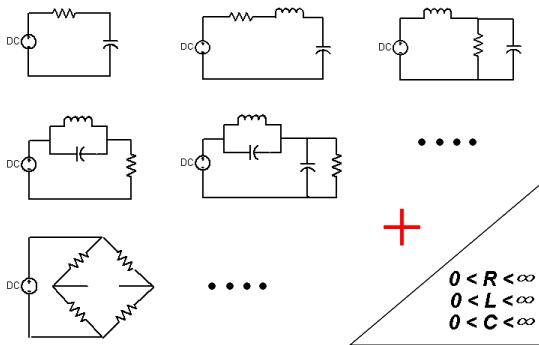


그림 3 다양한 형태의 회로 시스템
Fig. 3 Various types of circuit systems

2.4 플랜트와 제어기 설계의 동시 최적화 접근

플랜트와 제어기 설계를 동시 최적화 관점에서 접근하기 위해서는 다음과 같은 사항들이 필요하다.

- 설계에 대한 모델링 및 분석 도구
- 플랜트와 제어기의 일관된 모델링 방법

- 제한되지 않은 구조의 표현 및 생성
- 플랜트와 제어기의 통합 해석법
- 열린 구조에 대한 최적화 기법

이를 위하여 본드 그래프(bond graph)와 유전 프로그래밍(GP)을 결합한 접근법을 사용하여 모델 생성, 해석, 그리고 최적화를 수행한다. 이들 기법은 3절과 4절에서 설명한다.

3. 시스템 모델링 및 진화 생성 기법

3.1 복합 도메인 모델링

본드 그래프(bond graph)는 모델링 도구로서 동적 시스템의 모델링과 해석에 대한 일관된 접근법을 제공한다. 본드 그래프는 모델링이 쉽고, 시스템의 특성을 명확히 나타낼수 있으며, 동적 시스템의 상태방정식을 쉽게 유도할 수 있는 장점이 있다[5].

다음 그림 4은 간단한 동적 시스템의 예이다. 단일 도메인 시스템의 예로써, 왼쪽은 스프링-댐퍼-질량으로 구성된 기계적 시스템이고, 오른쪽은 저항(R), 인덕터(L), 캐패시터(C)로 구성된 RLC 전기회로이다. 가운데의 그림이 두 시스템의 등가적인 본드 그래프 모델을 나타낸다.

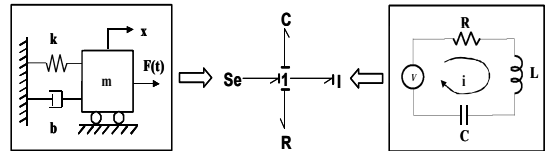


그림 4 간단한 동적 시스템의 예와 본드그래프 - 기계적 시스템, 전기 회로

Fig. 4 Simple example of dynamic systems and their bond graph model - mechanical system and electrical circuit

3.2 본드 그래프 구성요소

본드 그래프(bond graph)는 본드(bond)와 노드의 상호 연결된 조합으로 구성된다. 노드는 다음과 같이 몇가지 요소로 나뉘어진다. 첫째 에너지 발생요소로서 Se 와 Sf 가 있다. Se 는 작력소스(effort source)로서 작력(effort)을 입력으로 가지며, 전압, 힘, 압력 등에 해당한다. Sf 는 흐름 소스(flow source)로서 흐름을 입력으로 가지며, 전류, 속도, 유속을 예로 들 수 있다. 둘째, 에너지 저장 및 발산 요소로서, C , I , R 이 있다. C 는 캐패시턴스 요소로서 작력과 변위(displacement)간의 정적인 관계가 존재한다. 물리적인 스프링, 전기적인 캐패시턴스가 이에 해당한다. I 는 인덕턴스 흐름과 모멘텀과의 정적 관계를 포함하며, 물리적인 관성과 전기적인 인덕턴스를 예로 들 수 있다. R 은 저항 요소로서 작력과 흐름간의 정적인 관계가 성립한다. 물리적인 댐퍼, 전기적인 저항이 이에 해당한다. 그리고 접합요소로서 0-접합(junction-0) 1-접합(junction-1)을 포함한다. 0-접합에서는 작력변수가 연결된 모든 본드에서 공통이다. 1-접합에서는 흐름 변

수가 연결된 모든 본드에서 공통인 성질을 가지고 있다. 이 밖에 에너지 변환요소로서 트랜스포머 TF와 자이레이터 GY가 있다

4. 플랜트와 제어기의 복합 모델링 해석법

4.1 플랜트 상태방정식

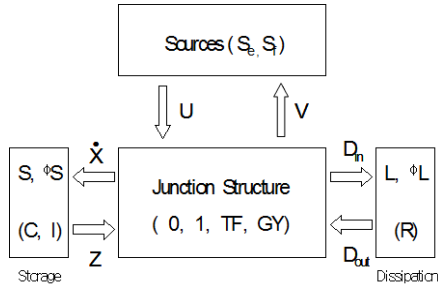


그림 5 시스템의 주요 벡터 및 관계

Fig. 5 Major vectors of system and causality

본드 그래프 모델에서 주요 벡터 및 관계는 그림 5에 나와 있다. 본드 그래프 모델로부터 인과분석(causality analysis)[5]와 0,1-접합에서의 에너지 흐름의 함으로부터 주요 구성요소들의 관계는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ D_{in} \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{XZ} & J_{XD} & J_{XU} \\ J_{DZ} & J_{DD} & J_{DU} \\ J_{VZ} & J_{VD} & J_{VU} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z \\ D_{out} \\ U \end{bmatrix} \quad (1)$$

그림 6에서 저장(storage) 영역에 대한 인과관계는 식 (2)와 같이 표현할 수 있고, 여기서, Z는 상호에너지 벡터, X는 에너지 벡터, S 는 정방행렬을 나타낸다.

$$Z = S \cdot X \quad (2)$$

그리고 소실(dissipation) 영역에 대한 인과관계는 다음과 같이 표현된다. 여기서, D_{out}은 출력벡터, D_{in}은 입력벡터, L 은 정방행렬을 나타낸다.

$$D_{out} = L \cdot D_{in} \quad (3)$$

X와 D_{in}에 대한 접합(junction) 구조는 다음 행렬식으로 표현될 수 있다.

$$\dot{X} = J_{XZ} \cdot Z + J_{XD} \cdot D_{out} + J_{XU} \cdot U \quad (4)$$

$$D_{in} = J_{DZ} \cdot Z + J_{DD} \cdot D_{out} + J_{DU} \cdot U \quad (5)$$

식 (3) 을 식 (5)에 대입하면 식 (7)을 얻을 수 있다.

$$D_{out} = L(I - J_{DD}L)^{-1}J_{DZ}Z + L(I - J_{DD}L)^{-1}J_{DU}U \quad (7)$$

식 (2)를 식 (7)에 대입하면 식 (8)이 된다.

$$D_{out} = L(I - J_{DD}L)^{-1}J_{DZ}SX + L(I - J_{DD}L)^{-1}J_{DU}U \quad (8)$$

식 (2)와 (8)을 식 (4)에 대입하면 식 (9)를 얻는다.

$$\begin{aligned} \dot{X} = & [J_{XZ}S + J_{XD}L(I - J_{DD})^{-1}J_{DZ}S]X \\ & + [J_{XU} + J_{XD}L(I - J_{DD})^{-1}J_{DU}]U \end{aligned} \quad (9)$$

이를 상태방정식 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + BU \\ A &= [J_{XZ} + J_{XD}L(I - J_{DD})^{-1}J_{DZ}]S \\ B &= [J_{XU} + J_{XD}L(I - J_{DD})^{-1}J_{DU}] \end{aligned} \quad (10)$$

4.2 플랜트와 제어기의 결합된 상태방정식

본드 그래프 모델로 구성된 플랜트와 라플라스 변수로 구성된 제어기의 결합된 상태방정식은 다음과 같이 유도될 수 있다. 그림 6의 우측에 있는 플랜트에 대한 상태방정식은 식 (11)과 (12)로 나타낼 수 있다.

$$\dot{X}_p = A_p \cdot X_p + B_p \cdot U_p \quad (11)$$

$$Y_p = C_p \cdot X_p + D_p \cdot U_p \quad (12)$$

그림 6 좌측의 제어기에 대한 상태방정식은 식 (13)과 (14)로 나타낼 수 있다.

$$\dot{X}_c = A_c \cdot X_c + B_{cc}U_c + B_{cs}U_s \quad (13)$$

$$Y_c = C_{cc} \cdot X_c + D_{cc}U_c + D_{cs}U_s \quad (14)$$

여기서, B_{cc}, B_{cs}, C_{cc}, D_{cc}, D_{cs}의 첨자는 제어기에서 입력이 기준입력(U_s)과 피드백에 의한 입력(U_c) 두 가지이므로 이를 구별하기 위해 사용한다.

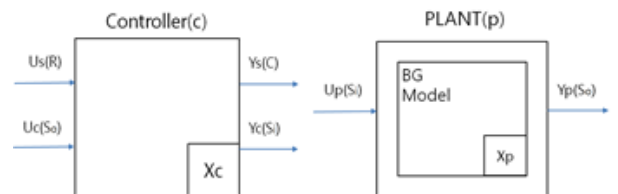


그림 6 플랜트와 제어기의 입출력 관계

Fig. 6 Input/output relationship for plant and controller

플랜트와 제어기의 연결을 위해서, U_c = Y_p, U_p = Y_c로 놓는다. 그리고, U_c와 U_p를 제거하기 위해서 식 (15)-(18)과

같이 전개한다.

$$\dot{X}_P = A_P \cdot X_P + B_P \cdot Y_C \quad (15)$$

$$Y_P = C_P X_P + D_P \cdot Y_C \quad (16)$$

$$\dot{X}_C = A_C X_C + B_{CC} Y_P + B_{CS} U_S \quad (17)$$

$$Y_C = C_{CC} X_C + D_{CC} Y_P + D_{CS} U_S \quad (18)$$

식 (18)에 식 (16)을 대입하면 다음과 같다.

$$Y_C - D_{CC}[C_P X_P + D_P Y_C] = C_{CC} X_C + D_{CS} U_S$$

$$[I - D_{CC} D_P] Y_C = D_{CC} C_P X_P + C_{CC} X_C + D_{CS} U_S$$

$D_I \equiv [I - D_{CC} D_P]^{-1}$ 라 놓으면

$$Y_C = (D_I \cdot D_{CC} C_P) X_P + (D_I C_{CC}) X_C + (D_I D_{CS}) U_S \quad (19)$$

여기서, $C'_P = D_I \cdot D_{CC} C_P$, $C'_{CC} = D_I C_{CC}$, $D'_{CS} = D_I D_{CS}$
 식 (16)에 식 (18)을 대입하면 다음과 같다.

$$Y_P = C_P X_P + D_P D_I D_{CC} C_P X_P + D_P D_I C_{CC} X_C + D_P D_I D_{CS} U_S$$

$$= [C_P + D_P D_I D_{CC} C_P] X_P + (D_P D_I C_{CC}) X_C + (D_P D_I D_{CS}) U_S \quad (20)$$

여기서, $C''_P = C_P + D_P D_I D_{CC} C_P$,
 $C''_{CC} = D_P D_I C_{CC}$,
 $D''_{CS} = D_P D_I D_{CS}$

식 (15)에 식 (19)을 대입하면 다음과 같다.

$$\dot{X}_P = A_P \cdot X_P + B_P [C'_P X_P + C'_{CC} X_C + D'_{CS} U_S] \quad (21)$$

$$= [A_P + B_P C'_P] X_P + [B_P C'_{CC}] X_C + [B_P D'_{CS}] U_S$$

여기서, $A_{PP} = A_P + B_P C'_P$,
 $A_{PC} = B_P C'_{CC}$,
 $B_{PC} = B_P D'_{CS}$

식 (17)에 식 (20)을 대입하면 다음과 같다.

$$\dot{X}_C = A_C X_C + B_{CC} [C''_P X_P + C''_{CC} X_C + D''_{CS} U_S] + B_{CS} U_S$$

$$= [A_C + B_{CC} C''_P] X_C + [B_{CC} C''_{CC}] X_P + [B_{CC} D''_{CS} + B_{CS}] U_S \quad (22)$$

여기서, $A_{CC} = A_C + B_{CC} C''_P$,
 $A_{CP} = B_{CC} C''_{CC}$,
 $B_{CC} = B_{CC} D''_{CS} + B_{CS}$

정리하면 통합 상태방정식은 다음 식 (23), (24)로 표현할 수 있다.

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} A_{PP} & A_{PC} \\ A_C & A_{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_P \\ X_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_P \\ B_C \end{bmatrix} U_S \quad (23)$$

$$Y = \begin{bmatrix} C'_P & C'_{CC} \\ C''_P & C''_{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_P \\ X_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D'_{CS} \\ D''_{CS} \end{bmatrix} U_S \quad (24)$$

4.1절과 4.2절을 종합하여, 플랜트에 대한 상태방정식과 제어기에 대한 상태 방정식이 주어지면, 이 둘을 결합하여 통합 상태 방정식을 구성할 수 있으므로, 전체 시스템의 성능 평가가 가능하다.

5. GP 기반 플랜트/제어기의 진화적 최적화 방법론

5.1 Genetic Programming

유전 프로그래밍(GP)[6]은 유전 알고리즘(GA)과는 달리 비트나 실수에 의한 스트링이 아닌 트리로 개체를 표현한다. 이때 트리의 노드는 하나의 함수나 터미널을 나타내며 각 개체는 이러한 함수와 터미널들의 집합으로 표현된다. 부가적으로 GA가 대부분 고정 크기의 염색체를 이용하는데 반해, GP는 트리의 특성상 가변크기의 염색체를 사용한다. 또한, 트리 형태를 사용하므로 유전자 크기가 가변이며, 구조적으로 열려진 공간의 탐색 문제에 적합하다. 그림 7에 두 개의 트리가 서로의 서브 트리를 교체하여 새로운 두 자손 개체를 생성하는 GP의 유전 연산이 설명되어 있다.

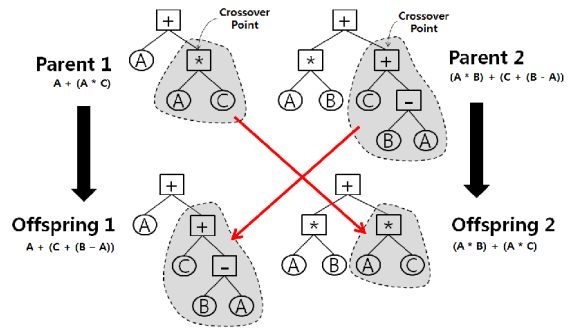


그림 7 GP의 유전 연산

Fig. 7 Genetic operation of GP

5.2 GP 기반 본드 그래프 진화 생성

GP를 통해 진화적으로 생성된 트리가 그림 8에 나와 있다. 트리의 각 노드내의 함수나 터미널은 본드 그래프 모델을 적합하게 생성하기 위해서 사전에 정의되었으며, 이 함수와 터미널들을 조합하여 임의의 트리 개체들을 생성하고 이들을 선택과 교배를 통해 진화시켜 적합도가 높은 개체를 생성한다. 그림 8을 그림 9의 초기(embryo) 모델에 적용시키면 점선 사이의 1과 0 점함점으로부터 원으로 표시된 새로운 부분이 생성된다.

그림 11의 위에 있는 트리는 ADF(Automatically Defined Function)라는 모듈 역할을 하는 기능으로, 그림 10의 피드백 루프에서 신호가 처리되는 과정을 나타내고 있다. 즉, 플랜트 출력 S_{10} 이 센서 H를 통해 기준입력 Ref와 비교된다. ADF는 아래 트리의 터미널에서 3번 사용되고 있는데, 이것은 PID의 3개 계수에 입력으로 들어간다. 그림 11의 아래는 PID 제어기 부분을 나타내며, ADF로부터의 신호인 S_8 를 공통으로 받고 각 P, I, D에 대한 계수를 Param 값으로 설정하여 PID 제어기 출력을 내보낸다. 이를 통해 나온 신호 S_1 이 본드 그래프 모델로 구성된 플랜트의 제어 입력으로 들어간다.

플랜트는 그림 8의 트리와 유사한 형태로 구성되며, GP 진화연산을 통해 임의의 본드 그래프 요소의 조합으로 생성된다. 그림 12는 플랜트와 제어기를 통합해서 표현한 개체 해로서, 이러한 해들을 평가, 교배 및 선택과정을 세대를 반복하여 수행한다. 즉, 제안된 방법을 통해 플랜트를 제어기와 결합하여 동시에 목적함수를 최적화하는 방향으로 진화시킬 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 제어기와 플랜트의 동시 진화적 최적화를 위하여, GP 기반의 본드 그래프 생성기법을 통해 제한되지 않는 플랜트를 표현하고, 제어기까지 단일 GP 개체로 통합하여 처리할 수 있는 방법을 제안하였다. 그리고 플랜트와 제어기에 대한 통합한 상태 방정식 해석과정을 도출하고, 플랜트/제어기에 대한 동시 최적화 방법론을 제안하였다.

향후, 상기 방법을 사용하여 실제 플랜트/제어기를 생성하고, 평가 및 진화를 통한 동시 최적화 실험이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 2014학년도 서경대학교 교내연구비 지원에 의하여 이루어졌음

References

[1] J. Park, H. Asada, "Concurrent design optimization of mechanical structure and control for high speed robots," ASME J Dynam Syst Meas Contr 1994; 116(3): 344-56.
 [2] T. Ravichandran, D. Wang, G. Heppler, "Simultaneous plant-controller design optimization of a two-link planar manipulator," Mechatronics 16 (2006) 233-242
 [3] K. Seo, J. Hu, Z. Fan, E. D. Goodman, and R. C. Rosenberg, "Toward an Automated Design Method for Multi-Domain Dynamic Systems Using Bond Graphs and Genetic Programming," Mechatronics, Elsevier, Volume 13, Issues 8-9, pp. 851-885, 2003

[4] K. Seo, "Bond Graph/Genetic Programming Based Automated Design Methodology for Multi-Energy Domain Dynamic Systems," Journal of Fuzzy Logic and Intelligent System, Vol. 16, No. 6, pp. 677-682, 2006
 [5] Karnopp DC, Rosenberg RC, Margolis DL. System dynamics, a unified approach. 3rd ed. John Wiley & Sons; 2000.
 [6] J. R. Koza, Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection, MIT Press, 1992
 [7] J. R. Koza, F. H. Bennet, D. Andre, M. A. Keane, F. Dunlap, Automate Synthesis of Analog Electrical Circuits by Means of Genetic Programming, IEEE Trans. on Evolutionary Computation, vol. 1, no. 2, pp. 109-128, 1997

저 자 소 개



서기성 (Kisung Seo)

1993년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업 (박사). 1999~2003년 Michigan State University, Genetic Algorithms Research and Applications Group, Research Associate. 2011~2012년 Michigan State University, BEACON(Bio/computational Evolution in Action CONSortium) Center, Visiting Scholar, 1993년~현재 서경대학교 전자공학과 교수. 관심분야는 진화연산, 최적화, 지능 로봇, 기상예측