

# GP 기반의 공학 설계를 위한 구조와 파라미터의 교대 탐색

## Topology/Parameter Alternation Search for GP-based Engineering Design

서기성<sup>1</sup>, 오성권<sup>2</sup>

<sup>1</sup>서경대학교 전자공학과, <sup>2</sup>수원대학교 전기공학과

Kisung Seo<sup>1</sup>, Sung-Kwun Oh<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Electronics Engineering Seokyeong University

<sup>2</sup>Dept. of Electrical Engineering The University of Suwon

E-mail : ksseo@skuniv.ac.kr

### 요 약

동적시스템의 공학적 설계는 대부분 구성요소들의 구조적 연결과 요소들의 파라미터들의 결정을 포함하며, 구조와 파라미터 모두 제한이 없는 열려진 특성을 가진다. 본 연구에서는 효율적인 구조/파라미터 탐색을 위한 교대 탐색법을 제안하고, 이를 멀티-에너지 도메인 시스템 해석 및 설계에 적합한 본드 그래프를 이용하여 고유값 설계 문제에 적용하였다.

### 1. 서론

동적시스템의 공학적 설계는 대부분 구성요소들의 구조적 연결과 요소들의 파라미터들의 결정을 포함한다[1-4]. 구조(topology)는 몇 가지 요소들로 이루어진 시스템의 구성을 나타내고, 파라미터 최적화는 주어진 구조에 대한 최적의 수치 값을 찾는 것이다.

진화연산(evolutionary computation)은 전기, 전자, 기계 분야등의 공학 시스템 설계에 많이 응용되고 있다[1-5]. 진화연산을 이용한 방법중, 일부 설계 문제는 트러스 설계에서와 같이 주어진 파라미터 값을 가지고 구조만을 결정한다, 여기서 구조는 트러스내의 멤버들의 연결을 의미한다[1]. 다른 한편으로, 트러스 멤버의 직경 크기 결정과 같이 주어진 구조하에서 파라미터만을 최적화하는 문제가 존재한다[2].

대부분의 공학 시스템 설계 문제는 구조(구성요소들의 연결)와 파라미터(요소들의 값)를 동시에 결정하여야 하며, 구조와 파라미터 모두 제한이 없는 열려진(open-ended) 형태이다[3-5].

그러나 아직까지 구조와 파라미터의 디자인 특성을 반영한 탐색법은 시도되지 않고 있다. 복잡

한 공학 시스템 설계에 대한 대부분의 진화적 접근법들은 거대한 개체수를 사용하거나[4], 문제중심표현 (problem-specific representations), 진화연산자(genetic operators), 그리고 디자인 규칙등을 사용하고 있다[5]

본 연구에서는 효율적인 구조/파라미터 탐색을 위한 교대 탐색법을 제안하고 이를 멀티-에너지 도메인 시스템 설계를 위한 본드 그래프 합성 문제에 적용하였다.

테스트 문제는 주어진 고유값(eigenvalues) 특성을 갖는 본드그래프 모델로 구성된 디자인 해를 발견하는 것으로서, 고유값 할당 문제는 제어시스템 설계분야에서 중요한 문제이며, 잘 정의되어 있고, 상수 파라미터를 가진 선형요소를 사용하여 효과적으로 연구되어 왔다.

다양한 고유값 군에 대해서 제안된 구조/파라미터 교대 탐색 기법이 실험되었다.

### 2. 구조와 파라미터 설계 문제

#### 2.1 공학시스템에서 구조/파라미터 설계 특성

구조와(또는) 파라미터를 결정해야 하는 공학 시스템 설계 문제는 다음 그림 1과 같이 나누어

질수 있고, 일반적으로 구조를 먼저 결정하고, 주어진 구조에 대해서 파라미터를 결정하는 방법은 설계자로 하여금 좋은 구조를 가진 후보들을 디자인 해의 계산된 성능보다 어떤 지식이나 규칙에 따라 생성할수 있어야 함을 요구한다. 이 방법은 전체 최적화와는 거리가 있으며, 자동적인 디자인 해의 탐색에는 적합하지 않다. 또한 어떠한 구조도 관계된 파라미터가 부재한 상태에서는 성능이 평가될수 없으며, 역으로 어떠한 파라미터도 구조와 결합되지 않으면 역시 성능이 평가될수 없다. 그러므로, 설계 문제의 전체 최적화를 위해서는 구조와 파라미터를 동시에 결정해야 한다.

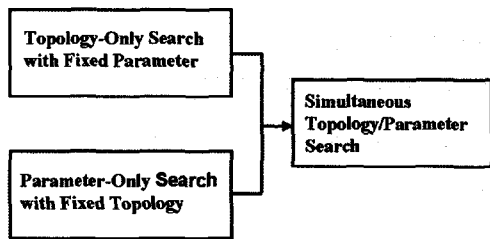


그림 1 구조/파라미터 설계 문제 분류

구조적 연결은 다음과 같이 정점 집합  $V$  와 아크 집합  $E$  로 구성된 방향성 그래프  $G$  로서 나타낼수 있다. 여기서,  $V = \{v_0, v_1, \dots, v_{n-1}\}$ ,  $E(G) = \{e_{ij} = \{v_i, v_j\} \mid v_i \in V, v_j \in V\}$ . 파라미터 값은 다음과 같은 함수로 표현될수 있다.  $G(f) = \{(v_i, f(v_i)) \mid v_i \in V, f(v_i) \in R\}$ .

구조/파라미터 설계를 포함하는 일반적이고 대표적인 문제로 아날로그 회로 설계를 들수 있다(그림 2). 선형 회로의 경우, 구성 요소로서 R, L, C 가 있고, 이들 구성요소가 직렬 또는 병렬의 다양한 조합으로 연결될수 있다. 또한 요소의 수는 제한되어 있지 않아서 같은 설계 목적에 대해서 회로 크기가 다양화 될수 있다. 각 요소의 파라미터 값도 역시 제한 범위가 없이 임의의 값이 설정될수 있다.

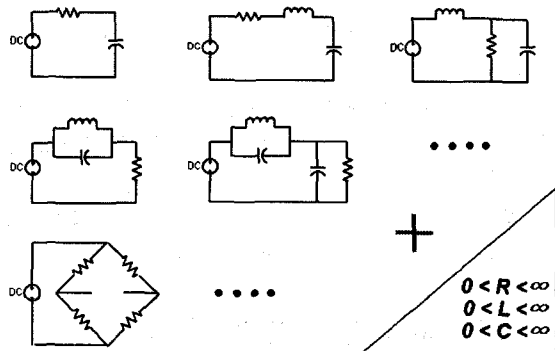


그림 2 구조/파라미터 설계 예 - 아날로그 회로

### 3. 구조/파라미터 고대 탐색 기법

#### 3.1 일반 GP

Genetic Programming(GP)[3] 은 GA 보다 구조적인 설계 문제에 더 많이 적용되어 왔으며, 내재적으로 구조와 파라미터의 동시 탐색에 적합하다. GP에서 구조와 파라미터 연산은 교차와 돌연변이를 통해 선택된 노드에서 이루어진다. 그리고 탐색은 구조와 파라미터 연산이 각 세대마다 혼합된 형식으로 행해진다.

#### 3.2 고정된 구조/파라미터 교대

일반 GP에서 행해지는 구조와 파라미터 연산이 혼합된 경우, 임의의 구조에 대해서 일정한 분량의 파라미터 탐색이 허용되기가 어렵다. 제안된 구조/파라미터 교대는 세대를 일정 구간별로 나누어 일정세대에서는 구조 연산만을 수행하고, 다른 일정세대에서는 파라미터 연산만을 수행하게 제어한다(그림 3). 즉 구조 연산 기간에는 GP 트리에서 교배나 돌연변이의 대상 노드로 오직 구조연산을 수행하는 노드만이 선택된다.

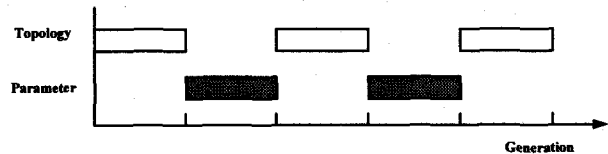


그림 3 고정된 구조/파라미터 교대

#### 3.3 편중된 구조/파라미터 교대

시스템에서 구조의 변경은 파라미터의 변화보다 더 근본적인 영향을 미친다. 시스템의 구조와 기능을 안정적으로 유지하면서, 해당 구조의 가능성을 탐색하기 위해서는 파라미터들을 충분히 조정하는 기회가 필요하다. 따라서 고정된 구간의 구조/파라미터 교대가 아닌 세대가 지남에 따라 파라미터 연산을 더 많이 수행하는 편중된 교대 기법이 추가적으로 제안 된다.

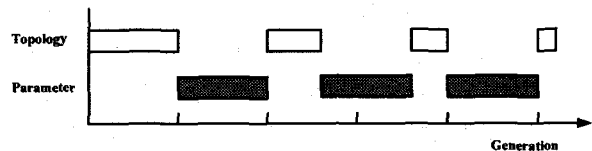


그림 4 편중된 구조/파라미터 교대

즉, 구조나 파라미터 연산 구간을 조정함으로써, 초기 세대에서의 파라미터 연산 비중보다 후기 세대에서의 파라미터 연산 비중이 더 높도록 조정한다(그림 4).

#### 4. 본드그래프 합성에서 구조/파라미터 설계

본드 그래프(bond graph)는 모델링 도구로서 동적 시스템의 모델링과 해석에 대한 일관된 접근법을 제공한다. 본드 그래프는 모델링이 쉽고, 시스템의 특성을 명확히 나타낼수 있으며, 본드 그래프 모델의 인과관계(causality)로부터 대수적인 연산을 통해 상태방정식을 쉽게 유도할수 있는 장점이 있다[6].

본드 그래프는 본드(bond) 와 노드의 상호 연결된 조합으로 구성되며, 다음과 같은 요소들이 있다. 에너지 발생요소인  $S_e$ ,  $S_f$ 와 에너지 저장 및 발산 요소로서, C, I, R, 그리고, 접합요소로서 0-접합(junction-0) 과 1-접합(junction-1) 이 존재한다. 이 밖에 에너지 변환요소로서 트랜스포머 TF 와 자이레이터 GY 가 있다.

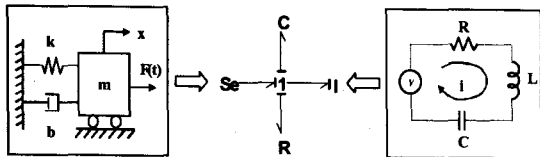


그림 5 간단한 동적 시스템의 예와 본드그래프 - 기계적 시스템, 전기 회로

그림 5 는 간단한 동적 시스템의 예이다. 단일 도메인 시스템의 예로써, 왼쪽은 스프링-댐퍼-질량으로 구성된 기계적 시스템이고, 오른쪽은 저항(R), 인덕터(L), 커패시터(C)로 구성된 RLC 전기회로이다. 가운데의 그림이 두 시스템의 등가적인 본드그래프 모델을 나타낸다.

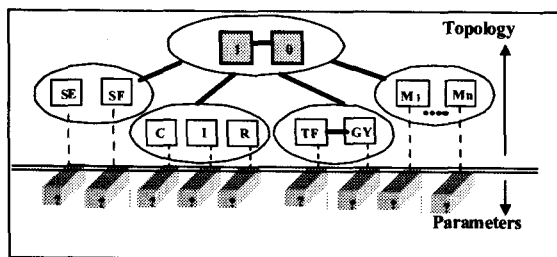


그림 6 본드 그래프 합성에서의 구조/파라미터 공간

본드그래프 합성에서 구조와 파라미터 공간은 그림 6과 같이 표현될수 있다. 상단의 굵은 실선은 구성요소간의 가능한 연결을 나타내고, 점선은 이들 요소가 가질수 있는 파라미터를 나타낸다. 즉 이중실선을 경계로 상단부분은 구조를 하단은 파라미터 공간을 의미한다.

본드 그래프와 GP 를 결합시킨 멀티-에너지

도메인 시스템을 위한 설계 방법론이 제안되었으며, 몇 가지 설계 문제에 효율적으로 적용된바 있다[7]. 이 방법론을 사용하여 본드 그래프를 합성하기 위해 표 1과 같은 구조와 파라미터로 분리된 GP 함수와 터미널을 정의하여 이용하였다.

표 1 구조와 파라미터로 분리된 GP 함수

Name	#Args	Description
add_C	4	Add a C element to a junction
add_I	4	Add an I element to a junction
add_R	4	Add an R element to a junction
insert_J0	3	Insert a 0-junction in a bond
insert_J1	3	Insert a 1-junction in a bond
replace_C	2	Replace the current element with a C element
replace_I	2	Replace the current element with an I element
replace_R	2	Replace the current element with an R element
+	2	Add two ERCs
-	2	Subtract two ERCs
erc	0	Ephemeral random constant (ERC)

#### 5. 고유값 설계 실험

제안된 구조/파라미터 교대 탐색 기법을 평가하기 위해서, 고유값 설계(할당) 문제에 적용하고 실험하였다. 설계 목적은 특정 고유값 집합이 주어지고 이로부터 가장 적은 거리 오차를 가진 합성된 본드 그래프 모델을 찾는 것이다. 적합도 함수의 정의는 다음과 같다.

$$Fitness(Eigenvalue) = 0.5 + \frac{1}{(2 + \sum Error / Order)}$$

그림 7은 6개의 고유값 문제에 대해서 구해진 디자인 해 중의 한 예이다. 실험을 위해 다음과 같은 6, 10, 16개 고유값 목표들의 집합이 GP 수행에 사용되었다.

- 1)  $\{-1 \pm 2j, -2 \pm j, -3 \pm 0.5j\}$
- 2)  $\{-1, -2, -3, -4, -5, -6, -7, -8, -9, -10\}$
- 3)  $\{-20 \pm j, -1 \pm 20j, -7 \pm 7j, -12 \pm 4j, -4 \pm 12j, -15 \pm 2j, -9 \pm 5j, -5 \pm 9j\}$

GP 프로그램은 lil-gp[8] 코드를 수정하여 사용하였으며, 사용된 GP 파라미터는 다음과 같다.

Number of generations : 500  
 Population sizes : 100 × 10 subpopulations  
 Initial population: half\_and\_half  
 Initial depth : 3-6

Max depth : 17  
 Selection : Tournament (size=7)  
 Crossover : 0.9  
 Mutation : 0.1

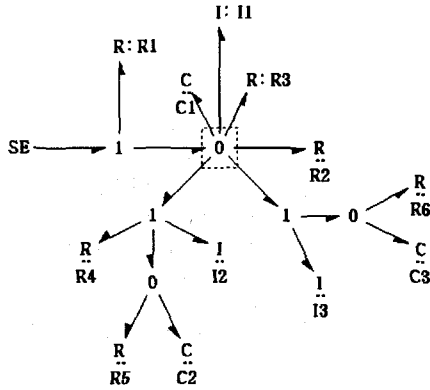


그림 7 합성된 본드 그래프 모델의 예 - 6개 고유값

표 2-4 에 고유값 설계에 대한 결과가 나와 있으며, 각 고유값 집합에 대해서 10회씩 수행되었다. 비교에 사용된 방법은 HFC[9] 알고리즘으로서, 기본 GP 에 비해 조기 수렴을 극복할수 있어 성능이 우수하다. 고정된 구조/파라미터 교대 방법(TPA Fixed)과 편중된 구조/파라미터 교대 방법(TPA Biased) 모두 HFC 결과에 비해 우수하였으며, TPA Biased 방법은 파라미터 연산에 대한 편중비율을 잘 조정할 경우, TPA Fixed에 비해 좀 더 향상될수 있음을 보여준다.

표 2. 6개 고유값 결과

6-Eigenvalue $\{-1 \pm 2j, -2 \pm j, -3 \pm 0.5j\}$					
HFC Only		TPA Fixed		TPA Biased	
Fitness	Error	Fitness	Error	Fitness	Error
0.941	0.275	0.952	0.221	0.965	0.151

표 3. 10개 고유값 결과

10-Eigenvalue $\{-1, -2, -3, -4, -5, -6, -7, -8, -9, -10\}$					
HFC Only		TPA Fixed		TPA Biased	
Fitness	Error	Fitness	Error	Fitness	Error
0.899	0.533	0.949	0.232	0.939	0.280

표 4. 16개 고유값 결과

16-Eigenvalue $\{-20 \pm j, -1 \pm 20j, -7 \pm 7j, -12 \pm 4j, -4 \pm 12j, -15 \pm 2j, -9 \pm 5j, -5 \pm 9j\}$					
HFC Only		TPA Fixed		TPA Biased	
Fitness	Error	Fitness	Error	Fitness	Error
0.899	0.534	0.926	0.358	0.939	0.279

## 6. 결론

동적시스템의 공학적 설계는 대부분 구성요소들의 구조적 연결과 요소들의 파라미터들의 결정을 포함하며, 구조와 파라미터, 모두 제한이 없는 열린 특성을 가진다. 본 연구에서는 효율적인 구조/파라미터 탐색을 위한 교대 탐색법을 제안하고 이를 멀티-에너지 도메인 시스템 해석 및 설계에 적합한 본드 그래프를 이용한 고유값 설계 문제에 적용하였다. 앞으로 충분한 실험이 수행되어야 하고, 구조/파라미터 교대 기법에 대한 심층적이 분석이 필요하다.

## 7. 참고문헌

- [1] Krish, U., "Optimal topologies of truss structures", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 72, pp.15-28, 1989
- [2] Goldberg, D.E. and Samtani, M. P., "Engineering optimization via genetic algorithms", *Proceedings of the Ninth Conference on Electronic Computations, ASCE*, pp.471-482, 1986
- [3] Deb, K, Gulati, S, "Design of Truss-Structures for Minimum Weight using Genetic Algorithms", *Journal of Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 37, 5, pp.447-465, 2001[1] E. Coelingh, T. J. A. de Vries, J. V. Amerongen, "Automated Performance Assessment of Mechatronic Motion Systems During the Conceptual Design Stage," *Proceedings of the 3rd International Conference on Advanced Mechatronics, Okayama, Japan*, pp.472-477, 1998
- [4] 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
- [5] T. R. Dastidar, P. P. Chakrabarti, P. Ray, "A Synthesis System for Analog Circuits Based on Evolutionary Search and Topological Reuse," *IEEE Trans. Evolutionary Computation*, vol. 9, no.2, pp. 211-224, 2005
- [6] Kamopp, D. C., Rosenberg R. C., Margolis, D. L., *System Dynamics, A Unified Approach, 3rd ed.*, John Wiley & Sons (2000)
- [7] 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, 2003, pp. 851-885
- [8] D. Zongker, W. Punch, *lil-gp 1.1 Users Manual*, Michigan State University, 1996
- [9] J. Hu, E. Goodman, K. Seo, Z. Fan, R. Rosenberg, "The Hierarchical Fair Competition (HFC) Framework for Continuing Evolutionary Algorithms", *Evolutionary Computation*, The MIT Press, Vol. 13 Issue 2, pp. 241-277, 2005