

글로벌 라우팅 유전자 알고리즘의 설계와 구현

Design and Implementation of a Genetic Algorithm for Global Routing

송호정, 송기용

Ho-Jeong Song, Gi-Yong Song

충북대학교 컴퓨터공학과 · 컴퓨터정보통신연구소

요약

글로벌 라우팅(global routing)은 VLSI 설계 과정중의 하나로, 네트리스트의 모든 네트들을 연결하기 위하여 각 네트들을 라우팅 영역(routing area)에 할당시키는 문제이며, 글로벌 라우팅에서 최적의 해를 얻기 위해 maze routing 알고리즘, line-probe 알고리즘, shortest path 기반 알고리즘, Steiner tree 기반 알고리즘등이 이용된다. 본 논문에서는 라우팅 그래프에서 최단 경로 Steiner tree 탐색방법인 weighted network heuristic(WNH)과 이를 기반으로 하는 글로벌 라우팅 유전자 알고리즘(genetic algorithm; GA)을 제안하였으며, 제안한 방식을 시뮬레이티드 어닐링(SA) 방식과 비교, 분석하였다.

Abstract

Global routing is to assign each net to routing regions to accomplish the required interconnections. The most popular algorithms for global routing include maze routing algorithm, line-probe algorithm, shortest path based algorithm, and Steiner tree based algorithm. In this paper we propose weighted network heuristic(WNH) as a minimal Steiner tree search method in a routing graph and a genetic algorithm based on WNH for the global routing. We compare the genetic algorithm(GA) with simulated annealing(SA) by analyzing the results of each implementation.

Key words : genetic algorithm, global routing, weighted network heuristic, minimal Steiner tree.

I. 서론

배치(placement) 단계에서 회로 블록과 핀들의 위치가 결정되면, 각 블록들 사이에 라우팅 영역이 생성된다. 배치 단계에서 생성된 라우팅 영역에 네트들의 위치를 결정하는 것을 라우팅(routing)이라 한다.

라우팅 문제는 연결선의 구체적인 위치를 결정하지 않고 각 네트들을 라우팅 영역에 할당시키는 글로벌 라우팅(global routing)과 각각의 라우팅 영역에 할당된 네트들의 구체적인 위치를 결정하는 디테일드 라우팅(detailed routing)의 두 단계로 나눌 수 있다[1][2].

글로벌 라우팅 문제를 해결하기 위한 maze routing 알고리즘[5][6], line-probe 알고리즘[7], shortest path 기반 알고리즘[8], Steiner tree 기반 알고리즘[9] 등은 그리드(grid) 기반 알고리즘으로 회로가 작은 경우에는 최적의 해를 얻을 수 있지만, 회로가 커질수록 계산 시간이 급격히 증가하는 단점이 있다.

시뮬레이티드 어닐링(SA)[3][4]은 조합 최적화 문제 해결에 적용되는 대표적 반복 휴리스틱 알고리즘으로 TimberWolf[10]등 실용 패키지뿐 아니라 알고리즘의 성능을 비교하는 벤치마크로 주로 사용된다.

유전자 알고리즘(genetic algorithm; GA)은 자연계의 진화를 기반으로 한 탐색 방법을 사용하여 시뮬레이티드 어닐링에 비해 효과적으로 최적해에 근접할 수 있다.

본 논문에서는 VLSI의 설계 과정 중 각 네트들을 라우팅 영역에 할당시키는 글로벌 라우팅 문제에 대하여 유전자 알고리즘을 이용한 해 공간 탐색 방식을 제안하였으며, 이 방식을 시뮬레이티드 어닐링 방식과 비교하여 분석하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서 글로벌 라우팅 문제에 대하여 알아보고, III장에서는 본 논문에서 제안한 글로벌 라우팅 유전자 알고리즘의 데이터 표현 방법과 알고리즘, 그리고 WNH 최단 경로 Steiner tree 탐색 알고리즘에 대하여 설명한다. IV장에서는 제안한 글로

별 라우팅 알고리즘과 시뮬레이티드 어닐링 방식을 비교하였고, 마지막으로 V장에서는 결론과 향후 연구 방향에 대하여 기술한다.

II. 글로벌 라우팅 문제

글로벌 라우팅 문제는 배치 단계에서 생성된 라우팅 영역에 모든 네트들을 할당시키는 문제이다. 즉 최적의 라우팅은 모든 네트들을 연결선의 길이가 최소가 되도록 연결시키는 것으로서, 라우팅 결과에 따라 연결선의 길이와 칩 면적이 영향을 받는다.

1. Minimal Steiner Tree

Minimal Steiner tree(MStT) 문제는 각 에지(edge)가 cost를 가지는 연결 그래프 $G=(V, E)$ 에서 부집합 $W(W \subseteq V)$ 에 대하여 $W \subseteq V'$ 이고 cost의 합이 최소가 되는 부그래프 $G'=(V', E')$ 을 구하는 문제로, cost를 최소화하는 해 G' 를 MStT라 하며, 그래프 G' 에서 $V'=W \cup S$ 인 집합 $S \subseteq V-W$ 를 Steiner 정점이라 한다. Rectilinear Steiner tree(RStT) 문제는 MStT의 특수한 경우로서 수직, 수평선만을 사용하여 정점들을 연결하는 최단 경로 부그래프 G' 을 찾는 문제이다.

2. 글로벌 라우팅 문제

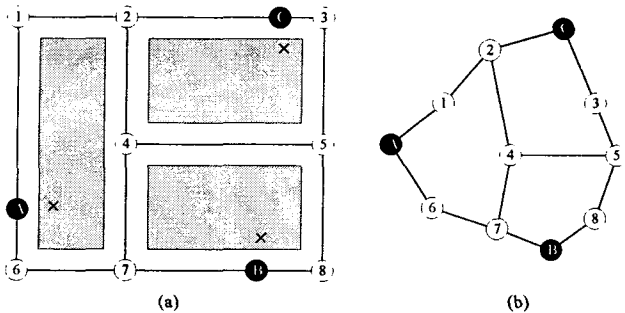


그림 1. (a) 라우팅 영역 (b) 라우팅 그래프
(c) 라우팅 해

Fig. 1. (a) Routing area. (b) Routing graph.
(c) Routing solution.

VLSI 설계에서 수직, 수평선만을 사용하여 네트들을 연결할 경우, 글로벌 라우팅은 배치단계에서 생성된 라우팅 영역을 이용하여 라우팅 그래프를 생성하고, 이 라우팅 그래프를 이용하여 MStT를 탐색하는 과정이다.

그림 1은 라우팅 영역과 라우팅 그래프를 보인다. 그림 1(a)는 배치가 이루어진 블록 사이의 라우팅 가능한 영역을 나타낸 것이며, 그림 1(b)는 라우팅 영역을 그래프로 나타낸 라우팅 그래프이다. 그림 1(c)는 라우팅 그래프에서 탐색된 라우팅 해인 MStT를 보이고 있다.

III. 글로벌 라우팅 유전자 알고리즘

유전자 알고리즘은 진화 과정에서 유도된 탐색방법으로, 이 알고리즘은 염색체와 유사한 자료구조를 사용하여 해공간을 부호화하며, 부호화한 자료 구조에 재조합 연산자를 적용하여 염색체들을 진화시킨다.

유전자 알고리즘은 처음에 임의로 선택된 염색체 집단(population of chromosome)에서 시작하며, 이러한 염색체 집단 중에서 일정한 방식으로 부모 염색체를 선택하고 이들 부모 염색체를 교배시켜 자식 염색체를 생성한다. 새로 생성된 자식 염색체는 평가함수에 의해 평가되며 좋은 평가 결과를 가지는 염색체가 다음 세대에 살아남을 확률이 높게 된다. 이와 같은 방식으로 유전자 알고리즘은 염색체 집단의 진화를 통하여 최적해에 근접할 수 있으므로, 최적 해를 구하기 어려운 여러 NP-문제에 적용될 수 있다.

1. 염색체의 표현

글로벌 라우팅 문제는 배치 단계에서 생성된 라우팅 영역에 모든 네트들의 위치를 결정하는 문제로서, 주어진 그래프 G 에서 부집합 W (그림 2의 정점 A, B, C, D)를 연결하는 MStT를 찾는 것이다(그림 2).

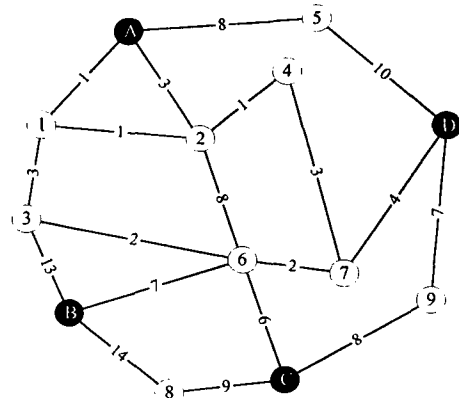


그림 2. 라우팅 그래프의 예

Fig. 2. Example of the routing graph.

그러므로 글로벌 라우팅 문제를 유전자 알고리즘으로 표현하기 위해서는 각 정점이 사용되었는지 여부를 나타낼 수 있어야 한다.

주어진 그래프 G 에서 부집합 W 를 제외한 나머지 정점들의 사용여부를 그림 3과 같이 표현할 수 있다.

그림 3은 그림 2의 정점들 중에서 1, 2, 3, 4, 5, 7번 정점만을 사용하여 MStT를 구하게 되는 것을 의미한다.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	1	1	1	0	1	0	0

그림 3. 염색체의 표현

Fig. 3. Representation of chromosome.

2. Weighted Network Heuristic(WNH)

WNH는 본 논문에서 제안한 라우팅 그래프에서의 MStT 탐색 방법으로 WNH의 경로 탐색은 다음과 같다.

알고리즘 A. Weighted Network Heuristic Algorithm A. Weighted Network Heuristic

단계 1 : 모든 에지의 거리를 cost로 나타낸 그래프 G 에서 에지의 사용횟수(weight)를 0으로 초기화한다.

단계 2 : 연결해야할 모든 부집합 W 의 각 쌍들의 최소 경로를 구한다. 이때 사용된 에지들의 weight를 1씩 증가시킨다.

단계 3 : weight가 0인 에지를 삭제한 후, 에지의 수가 0인 정점을 삭제한다.

단계 4 : 단계 3에서 얻은 그래프에서 에지의 weight와 cost를 사용하여 다음과 같은 방법으로 MStT를 구한다.

- a : weight가 가장 높은 에지를 선택한다. 이때 weight가 같은 에지는 cost가 적은 순으로 선택한다.
- b : 선택된 에지와 연결된 모든 에지 중에서 a의 방법으로 다음 에지를 선택하면서, 트리를 만들어 간다.
- c : 모든 정점이 연결되어 MStT가 만들어졌거나, 모든 부집합 W 가 연결되었으면 단계 5. 그렇지 않으면 b의 방법으로 계속 에지를 선택한다.

단계 5 : 부집합 W 를 제외한 정점들 중에서 한 개의 에지만을 가진 모든 정점을 반복해서 삭제한다.

그림 4에서 WNH를 사용한 최소 경로 탐색의 예를 보인다.

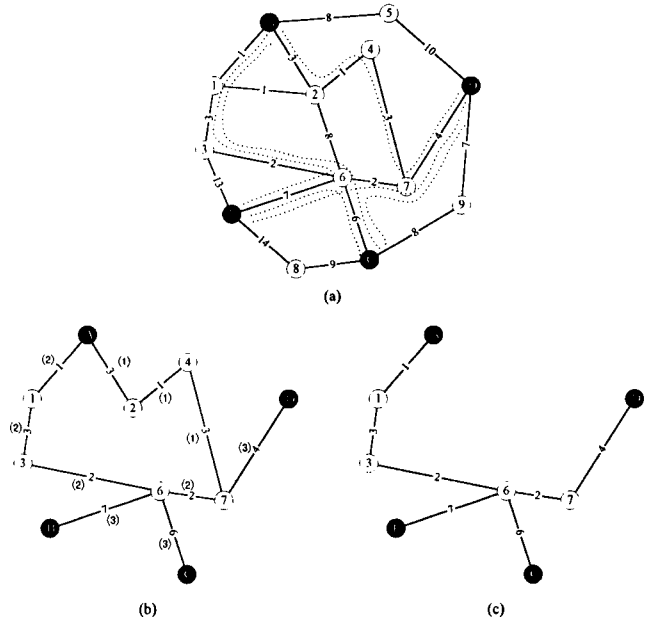


그림 4. WNH 예 (a) W 의 각 쌍들의 최소 경로 (b) 사용된 에지들의 weight (c) MStT

Fig. 4. Example of WNH. (a) Shortest path for each pair of W . (b) Weight of used edge. (c) MStT.

3. 평가함수(Evaluation Function)

유전자 알고리즘이 진행되는 동안 현재 모집단의 개체들은 특정 평가함수에 의해 평가된다. 글로벌 라우팅 문제에서의 평가함수는 그래프 G 에서 부집합 W 를 모두 연결하는 edge들의 cost의 합으로 나타낸다(식 1).

$$F(G) = \sum_{e \in E_i} Cost_{e_i} \tag{1}$$

4. 교배 연산자(Crossover Operator)

유전자 알고리즘에서 각 세대의 모집단은 교배를 통해 각 부모의 유전 정보를 상속받게 된다. 이러한 교배로 생성되는 자손들 중 좋은 형질을 상속받은 자손은 다음 세대에 살아남을 높은 확률을 가지게 되고, 그렇지 않은 자손은 낮은 확률을 가지게 된다.

본 논문에서는 2-점 교배 연산자를 사용하여 교배 연산을 수행하였다.(그림 5).

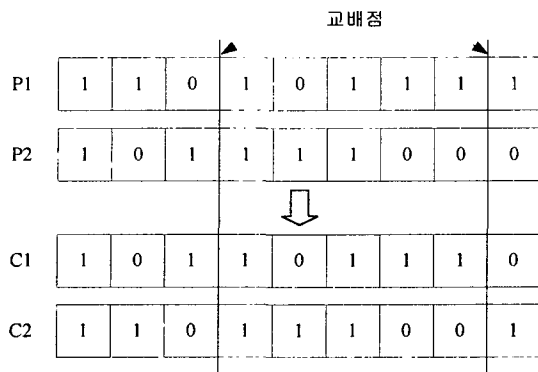


그림 5. 2-점 교배 연산
Fig. 5. 2-point crossover operation.

5. 돌연변이(Mutation)

유전자 알고리즘에서 각 세대의 모집단은 진화를 진행하면서 얻고자 하는 해에 가까운 염색체들로 구성된 모집단으로 수렴하게 되지만, 그 결과가 최적해가 아닌 지역해로 수렴할 수도 있으며, 이러한 지역해로의 수렴을 막기 위하여 돌연변이 연산을 수행하게 된다.

본 논문에서 사용한 돌연변이 연산 방법은 염색체의 각 위치를 돌연변이율 P_m 에 의해서 반전시키는 방법으로 사용하였다.(그림 6).

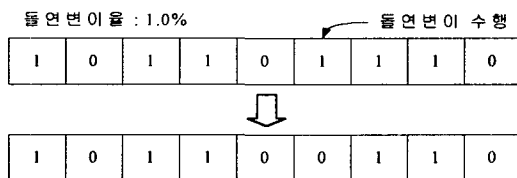


그림 6. 돌연변이 연산
Fig. 6. Mutation operation.

6. 글로벌 라우팅 유전자 알고리즘

알고리즘 B는 본 논문에서 제안한 글로벌 라우팅 유전자 알고리즘을 나타낸다.

알고리즘 B. 글로벌 라우팅 유전자 알고리즘
Algorithm B. Genetic algorithm for global routing.

단계 0 : 파라미터들의 설정

객체들의 수를 나타내는 pop_size , 돌연변이율을 나타내는 P_m , 그리고 최대 생성 횟수를 나타내는 max_gen 을 설정한다.

단계 1 : 초기 모집단의 생성

pop_size 만큼의 각기 다른 객체 $S_i(i=1, \dots,$

$pop_size)$ 를 임의로 생성한다.

단계 2 : 각 객체에 WNH를 적용하여 MStT를 구한 후, 평가함수를 이용하여 모든 객체들의 $F(G)$ 값을 구한다.

단계 3 : 교배

모집단으로부터 두 개의 부모 염색체 P1, P2를 임의로 선택하고, 2-점 교배 연산을 수행하여 새로운 자식 염색체 C1, C2를 생성한다.

단계 4 : 돌연변이

염색체의 각 위치를 임의로 생성한 $\epsilon \in (0,1)$ 과 돌연변이율 P_m 을 비교하여 만일 $\epsilon < P_m$ 이면 돌연변이 연산을 수행한다.

단계 5 : 만일 생성된 자식 염색체 C1 또는 C2가 모집단 내의 어느 객체와 같다면, C1 또는 C2가 같은 객체가 없는 새로운 객체가 될 때까지 돌연변이 연산을 수행한다.

단계 6 : 새로운 세대의 구성

모집단 내의 최대 $F(G)$ 값을 갖는 두 개의 염색체를 삭제하고 생성된 자식 염색체 C1과 C2를 모집단 내에 추가한다.

단계 7 : 새로운 염색체의 생성 횟수가 max_gen 이 될 때까지 단계 1부터 6까지를 반복한다. 최적해는 모집단 내에서 가장 작은 $F(G)$ 값을 갖는 염색체이다.

IV. 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 글로벌 라우팅 유전자 알고리즘의 시뮬레이션을 위하여 일정 개수의 모듈과 네트워크에 대한 배치 데이터를 생성하고, 생성된 데이터에 시뮬레이터드 어닐링과 글로벌 라우팅 유전자 알고리즘을 적용하여 그 결과를 분석하였다. 또한 벤치마크 회로인 MCNC 회로에 대하여 동일 알고리즘을 적용하여 결과를 비교하였다.

본 시뮬레이션에서는 유전자 알고리즘의 돌연변이율 $P_m=1.0$, 모집단내의 개체의 수 $pop_size=20$, 최대 수행 횟수 $max_gen=10000$ 을 사용하였고, 시뮬레이터드 어닐링의 온도에서의 알고리즘수행 횟수 $M=100$, 최대 수행 횟수 $max_time=10000$, 초기 온도 $T=10$, 냉각 파라미터 $\alpha=0.9$, 그리고 $\beta=1.0$ 의 값을 사용하였다.

그림 7, 8, 9는 임의로 생성된 데이터에 시뮬레이터드 어닐링과 글로벌 라우팅 유전자 알고리즘을 적용한 결과의 최적값, 최악값, 평균값을 가지고 각 알고리즘을 비교한 것을 보이고 있다. 자세한 수치 결과는 Appendix의 표 2에 보였다.

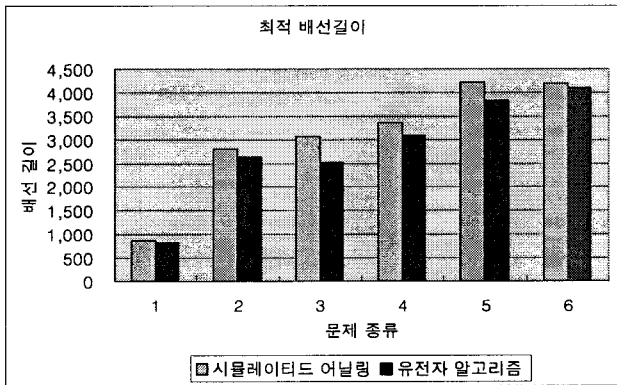


그림 7. 최적 배선길이 비교

Fig. 7. Comparison of the best case wire length.

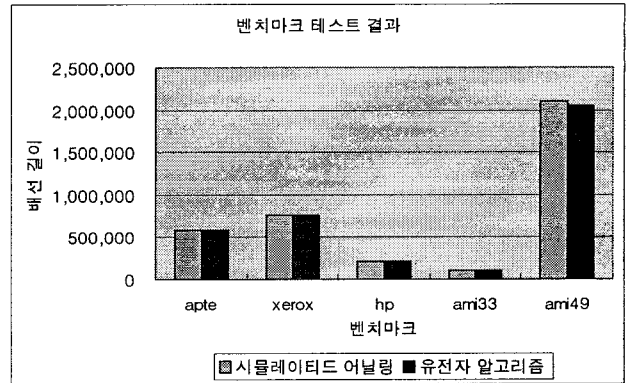


그림 10. 벤치마크 테스트 결과

Fig. 10. Benchmark test result.

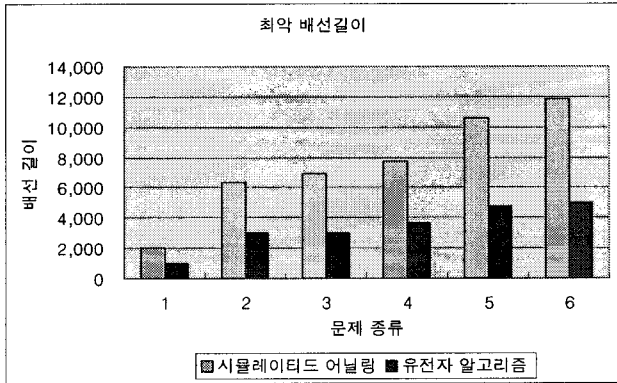


그림 8. 최악 배선길이 비교

Fig. 8. Comparison of the worst case wire length.

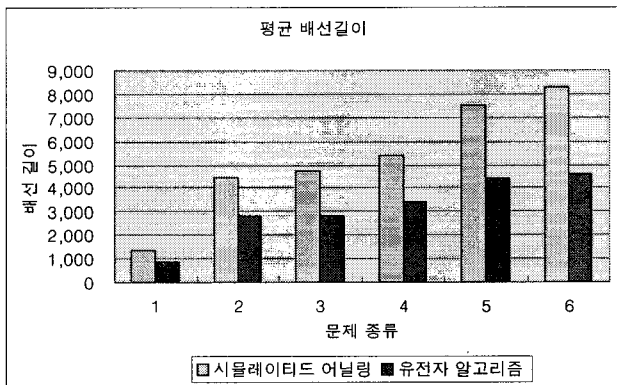


그림 9. 평균 배선길이 비교

Fig. 9. Comparison of the average wire length.

또한, 그림 10은 벤치마크 회로인 MCNC 회로에 대하여 동일 알고리즘을 적용한 결과를 보이고 있다.

표 1은 MCNC 벤치마크 회로에서 시뮬레이티드 어닐링 알고리즘에 대한 글로벌 라우팅 유전자 알고리즘의 개선도를 나타낸 것이다. 개선도를 얻기 위해 사용된 식은 다음과 같다.

$$\text{개선도}(\%) = (SA - GA) / SA * 100 \quad (2)$$

표 1. GA의 개선도

Table 1. Improvement by percentage of GA

벤치마크	모듈 개수	개선도
apte	9	0.50
xerox	10	0.81
hp	11	0.46
ami33	33	0.35
ami49	49	2.45

그림 11은 임의로 생성된 회로에 글로벌 라우팅 유전자 알고리즘을 적용한 결과이다.

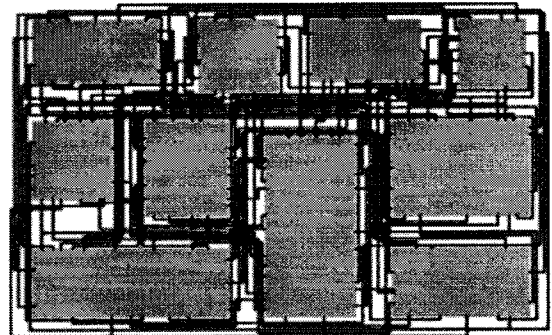


그림 11. 임의 생성 회로의 글로벌 라우팅 결과

Fig. 11. Routing result for random circuit.

두 알고리즘의 시뮬레이션 결과 글로벌 라우팅 유전자 알고리즘이 시뮬레이티드 어닐링보다 더 좋은 결과를 얻는 것을 알 수 있다.

시뮬레이티드 어닐링은 초기에는 지역해에서 벗어날 수 있는 확률이 높으나, 냉각과정이 진행되면서 지역해에서 벗어날 수 있는 확률이 낮아져서 일정 횟수를 수행한 후에는 더 좋은 해를 찾을 가능성이 작아지게 된다. 반면에 유전자 알고리즘은 교배와 돌연변이 연산을 사용한 이웃해로의 이동범위 광역화에 의한 효과적인 해공간 탐색으로 시뮬레이티드 어닐링에 비해 더 좋은 최적해를 찾게 된다.

또한, 글로벌 라우팅 유전자 알고리즘에서는 라우팅 그래프에서의 MST 탐색 방법으로 WNH 방법을 제안하여 효과적인 탐색이 가능하였다.

V. 결론

본 논문에서는 VLSI 설계 과정 중 글로벌 라우팅 문제에 대하여 유전자 알고리즘을 제안하였으며, 제안한 방식을 시뮬레이티드 어닐링 방식과 비교, 분석하였다.

제안한 글로벌 라우팅 유전자 알고리즘과 시뮬레이티드 어닐링 방식을 임의로 생성한 회로와 벤치마크 회로에 적용하여 비교, 분석한 결과 제안한 글로벌 라우팅 유전자 알고리즘이 시뮬레이티드 어닐링 방식보다 더 효과적으로 최적해에 근접하는 것을 알 수 있었다.

앞으로 디테일드 라우팅 문제에 적용할 수 있는 유전자 알고리즘에 대한 연구가 필요하다고 생각된다.

Appendix

표 2. SA와 GA의 임의 생성 데이터 테스트 결과
Table 2. Random data test result for SA, GA

문제 종류	블록 개수	네트 개수	시뮬레이티드 어닐링			유전자 알고리즘		
			최적	최악	평균	최적	최악	평균
1	10	50	864	2016	1359.0	810	936	870
2	12	60	2800	6300	4463.2	2640	2960	2820
3	14	70	3072	6960	4734.8	2520	2952	2823.8
4	16	80	3360	7776	5433.4	3096	3612	3384.2
5	18	90	4212	10608	7516.2	3822	4732	4393.8
6	20	100	4200	11832	8275.2	4104	4992	4577.8

접수일자 : 2002. 4. 19 수정완료 : 2002. 5. 3

참고문헌

- [1] S. M. Sait, H. Youssef, *VLSI Physical Design Automation Theory and Practice*, World Scientific Publishing, 2001.
- [2] Naveed A. Sherwani, *Algorithms for VLSI Physical Design Automation. 3rd Edition*, Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [3] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt and M. P. Vecchi. Optimization by Simulated Annealing, *Science*, vol. 220, no. 4598, pp.671-680, 1983.
- [4] S. M. Sait, H. Youssef, *Iterative Computer Algorithms with Applications in Engineering*, Computer Society, 1999.
- [5] C.Y.Lee. An algorithm for path connections and its application. *IRE Transactions on Electronic computers*, 1961.
- [6] K.J.Supowit. Finding a maximum planar subset of a set of nets in a channel. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design*, CAD-6(1), pp. 93-94, January 1987.
- [7] D.W.Hightower. A solution to the line routing problem on a continuous plane. *Proc. 6th Design Automation Workshop*, 1969.
- [8] E.W.Dijkstra. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische mathematik*, 1, pp. 269-271, 1959.
- [9] S.Burman, H.Chen, and N.Sherwani. Improved global routing using λ -geometry. *Proceedings of 29th Annual Allerton Conference on Communications, Computing, and Controls*, October 1991.
- [10] C.Sechen and A.L.Sangiovanni-Vincentelli. Timberwolf3.2: A new standard cell placement and global routing package. *Proceedings of 23rd Design Automation Conference*, pp. 432-439, 1986.



송호정(Ho-Jeong Song)

準會員

1994년 배재대학교 물리학과 이학학사
1996년 청주대학교 전자공학과 공학석사
2001년 충북대학교 컴퓨터공학과
박사수료

관심분야 : VLSI 설계, High-level Synthesis



송기용(Gi-Youn Song)

正會員

1974~80년 서울대, 동대학원(전자공학)
1995년 Univ. of Southwestern
Louisiana 공학박사
1983년~현재 충북대학교 공과대학
컴퓨터공학과 재직중

관심분야 : 컴퓨터구조, VLSI 설계등
