

# 시뮬레이티드 아닐링을 이용한 CNC 라우터 공구경로의 최적화

조 경 호\*

## Optimization of CNC Router Tool Paths using Simulated Annealing

Kyung-Ho Cho\*

### ABSTRACT

In this study, a program has been developed to generate the optimal tool paths for a CNC 2D router machine. For the optimization algorithm, the Simulated Annealing algorithm is used with some modifications for the specific manufacturing constraints. The program developed here can generate automatically the multi tool paths for the several drilling, riveting, milling and de-riveting operations.

**Key Words** : SA(simulated annealing), combinatorial optimization, tool path, CNC router

### 1. 서 론

2차원 형상의 부품을 가공하는 방법에는 일반적으로 편칭 공구를 이용한 편칭절단법, 레이저, 플라즈마나 화염을 이용한 laser-flame cutting 방법, 의류소재, 신발산업에서의 부품들과 항공산업에서의 알루미늄 소재부품 등과 같이 소재의 특성상 화염절단이 어려워 NC milling을 이용한 라우팅 방법이나 NC knife cutter 혹은 water jet을 사용하는 방법들이 있다. 수치제어 편칭머신을 이용하는 편칭작업은 확보하고 있는 편칭공구로 부품경계가 정확히 편칭가공될 수 있는 경우에 주로 사용되고, 레이저 등을 이용한 화염절단 방법과 라우팅 혹은 나이프컷팅, water

jet 절단법은 부품경계가 복잡하거나 자유곡선으로 이루어져서, 확보하고 있는 편칭공구로 정확히 편칭하기 어려운 경우에 사용된다. 이러한 가공기들은 현재 대부분 수치제어로 구동되도록 되어 있어서 사용자는 이 기계에 적절한 방법으로 수치제어 절단 데이터를 제공하여야 한다.

이중 본 연구에서는 밀링가공 순서에 관한 여러 구속조건들을 함께 고려하면서 공구이송경로를 최소화시키는 항공부품 가공기 전용의 수치제어 라우터의 공구경로를 최적으로 자동산출하는 프로그램을 개발하였다. 본 논문에서는 이 프로그램에서 채택하고 있는 SA(simulated annealing) 최적화 방법론에 대하여 논하고 간단한 적용 예를 통하여 이 프로그램의 작동 성능을 평가하였다.

\* 제주대학교 기계에너지생산공학부, 첨단기술연구소  
Faculty of Mechanical, Energy & Production Eng., Research Institute of Advanced Tech., Cheju Nat'l Univ.

## II. 본 론

### 2.1. 조합최적화 문제와 SA

본 연구에서 해결하고자 공구경로의 최적화문제와 같이 수많은 국지해 (local minima)를 갖는 조합최적화 문제(Combinatorial Optimization Problems)들은 최적해를 구하는데 있어서의 난이도에 따른 분류로 볼 때 NP complete (non-deterministic polynomial time complete[1]) 문제에 해당된다. 이들 문제는 비결정성 (non-deterministic)과 미분 불가능성(non-differentiable)이라는 특징을 갖고 있기 때문에 종래의 Newton 방법과 같이 목적함수의 변화율에 근거한 최적화기법 (gradient based optimization algorithm)으로는 전역 최적해 (global optima)에 도달하기 어렵고 주로 국지해(local optima)에 빠지기 쉽다. 따라서, 수많은 국지해를 거쳐 전역 최적해에 도달하기 위해선 다음과 같은 특성을 갖는 최적화 기법이 필요하다. 즉, 국지해에 빠졌더라도 더 좋은 해를 찾기 위해 이를 탈출할 수 있는 기능이 필요하다. 이는 목적함수 값이 증가 혹은 악화되는 방향으로도 해의 탐색이 일부 진행될 수 있는 능력을 의미하며, 통상 힐클라이밍 능력(hill climbing ability)이라 한다. 이에 덧붙여서, 이미 과거 어느 순간 방문되었던 해라 할지라도 필요에 따라선 다시 과거의 그 해로 되돌아가서 새로운 탐색을 시도할 수 있는 능력이 필요하다. 이를 백트래킹 능력(back-tracking ability)이라 칭한다. 이상의 두 특성을 갖춘 최적화 기법으로 최근 주목을 받고 있는 것으로 SA[2,3]와 타부탐색(tabu search[4])이 있다.

1953년 Metropolis *et al*[5]은 물질의 열적 평형상태의 변화를 시뮬레이션 하기 위해 몬테카를로 방법이라는 효과적인 알고리즘을 제시하여 통계 열역학 분야에 크게 기여한 바 있다. 그 후 Kirkpatrick *et al*[2] 및 Cerny[3]는 각각 조합최적화 문제에서의 목적함수의 최소화 과정과, 자연계의 대부분의 물질이 그 물질의 기저 에너지 상태(ground state)에 도달하기까지의 점진적 냉각과정 사이에는 매우 밀접한 유사성이 존재하는 것을 깨닫고, 앞의 Monte Carlo 방법[5]을 이용한 새로운 최적화 기법을 SA라는 이름으로 제시하였다. 그 후 여러 연구결과[6,7]에 따르면

다양한 구속조건들을 고려하여 해석적 수식으로 목적함수를 표현하는 것이 용이하지 않고, 국지해가 많은 다자유도의 조합최적화 문제에서 SA 알고리즘이 효과적인 결과를 보여주는 것으로 나타나고 있다.

공구경로의 최적화문제는 일반적으로 잘 알려진 TSP (travelling salesman problem, 방문판매원 문제)와 수학적으로 유사하다. TSP는 분류상 IP(integer programming)문제에 해당한다. IP문제를 다루는 방법이 여러 가지로 연구되어 왔지만, 위에 부여된 모든 구속조건들을 조금도 완화(relaxation)시키지 않고 최적해를 직접 구한다는 것은 현재의 IP문제에 대한 연구수준에선 매우 어려운 것으로 알려지고 있다. 참고로, IP 문제는 일반적으로 같은 크기의 LP(linear programming)문제에 비해 최적해를 구하는데 있어서의 어려움이 대략 10배 이상이 되어[4], SA알고리즘이 제안되기 전인 1980년도 중반까지만 해도 TSP문제를 효과적으로 다룬 연구사례 중 문제 크기가 가장 컸던 것이 318개 도시의 효과적인 방문 경로 산출문제였던 것으로 보고되고 있다[2,6]. 본 연구에서는 위에 정의된 문제의 탐색영역을 분리 혹은 완화하지 않고 최적해 혹은 최적해에 근접한 해를 얻기 위해, NP complete 문제 해결에 적합한 특성을 갖고 있으면서도 구현이 용이한 SA 알고리즘을 최적화 기법으로 사용하였다.

### 2.2. 목적함수 및 구속조건

앞에서 언급되었던 바와같이 공구경로의 최적화문제는 TSP와 수학적으로 유사하다. 다만, 공구경로의 최적화에서는 가공 특성 때문에 발생하는 몇가지의 특수한 구속조건이 추가로 부과되어야 한다는 면에서 일반적인 TSP에서 처럼 경로길이의 최소화만으로 문제를 해결할 수 없는 경우가 많다.

본 연구에서의 목적함수는 공구 이송경로의 총합으로 하였고 최적화의 목표는 목적함수의 최소화에 있다. 이때 얻어지는 공구경로는 다음과 같은 구속조건을 반드시 만족하도록 하였다. 즉,

구속조건 1 : 부품의 외곽경계 보다는 내부의 hole 들이 먼저 가공되어야 한다.

구속조건 2 : 작은 부품이 커다란 다른 부품의 내부

hole 속에 배치되어 있을 경우에는 작은 부품이 먼저 가공된 후에 큰 부품의 내부 hole이 가공되어야 한다.

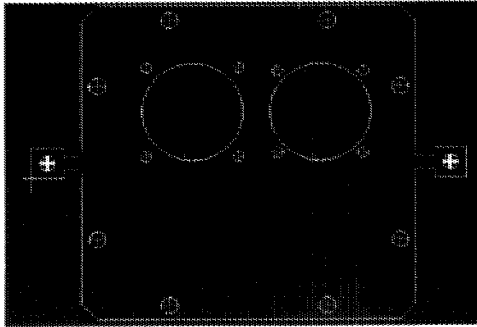


Fig. 1. Example part for constraint 1.

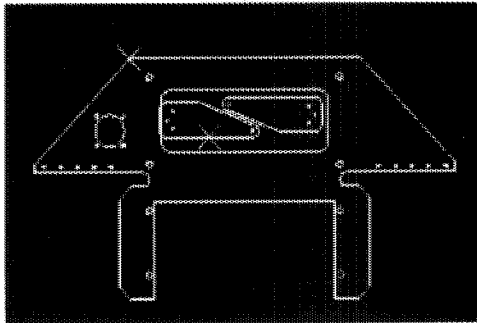


Fig. 2. Example for constraint 2.

Figs. 1, 2 는 구속조건 1, 2가 발생하는 상황에 대한 예시로서 경험적으로 볼 때 이와같은 상황에서는 가공 정밀도 유지를 위해서는 구속조건 1, 2와 같은 방법으로 가공하고 있다.

### 2.3 경로변화와 목적함수의 계산

최적화 과정 중 경로의 다양한 변화를 탐색하기 위해서 본 연구에서는 Lin[8]에 의해 제시된 다음과 같은 간단한 방법들을 사용하였다. 즉, Fig. 3(a)와 같이 경로 중 무작위로 선택된 연속한 몇 개의 중간 경로를 역으로 방문(reverse touring)하는 방법과, Fig. 3(b)와 같이 경로 중 임의로 선택된 연속한 몇 개의 중간 경로를 임의의 위치로 이동(shift touring)시키는 방법을 사용하였다.

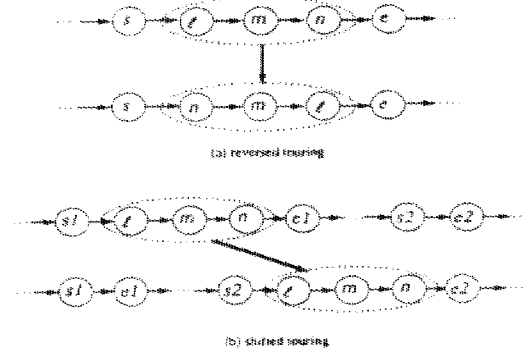


Fig. 3. Examples of tool path changes.

이러한 경로변화에 따른 목적함수 변화량  $\Delta cost$ 는 다음과 같이 간단히 계산된다. 즉,

- Reverse tour 인 경우

$$\Delta cost = C_{i,n} + C_{i,m} - C_{i,i} - C_{n,i} + \text{구속조건위배횟수변화} * w$$

- Shift tour 인 경우

$$\Delta cost = C_{i,m} + C_{e1,i} + C_{n,m} - C_{e2,e} - C_{e1,i} - C_{n,i} + \text{구속조건위배횟수변화} * w$$

여기서  $C_{ij}$ 는  $i$ 를 가공한 직후  $j$ 를 가공하기 위해서 위치  $i$ 에서  $j$ 로 공구가 이동하는 거리이다. 이상과 같은 이웃해 생성 및 목적 함수 변화량 계산방법의 장점은 임의로 선택된 연속한 가공부위의 개수와 무관하게 목적함수의 변화를 계산할 수 있는데 있다.

### 2.4. 냉각방법, Markov 사슬 길이 및 종료조건

본 연구에서는 SA에서의 온도변화를  $T^{k+1} / T^k \approx 0.8 \sim 0.95$ 로 하였다. 특정 온도에서 경로변화 시도횟수를 Markov 사슬길이라 하는데 본 연구에서는 경로 이동 횟수에 비례하도록 하였다. 또한, (a) 지정된 탐색 회수동안 목적함수의 최소값이 변하지 않거나, (b) 온도가 지정된 최저온도  $T_{min}$ 보다 작아졌거나, (c) Markov 사슬길이 동안에 탐색이동이 한번도 성공하지 못한 경우에 다다르면 전체 실행을 종료하도록 하였다.

앞에 설명한 냉각방법, Markov사슬 길이 및 종료조건 등은 SA의 수렴에 중요한 영향을 주는 것으로 참고문헌[6,7]에 여러 연구사례가 소개되고 있으나 아직은 정형화된 연구결과가 없는 것으로 알려지고 있어,

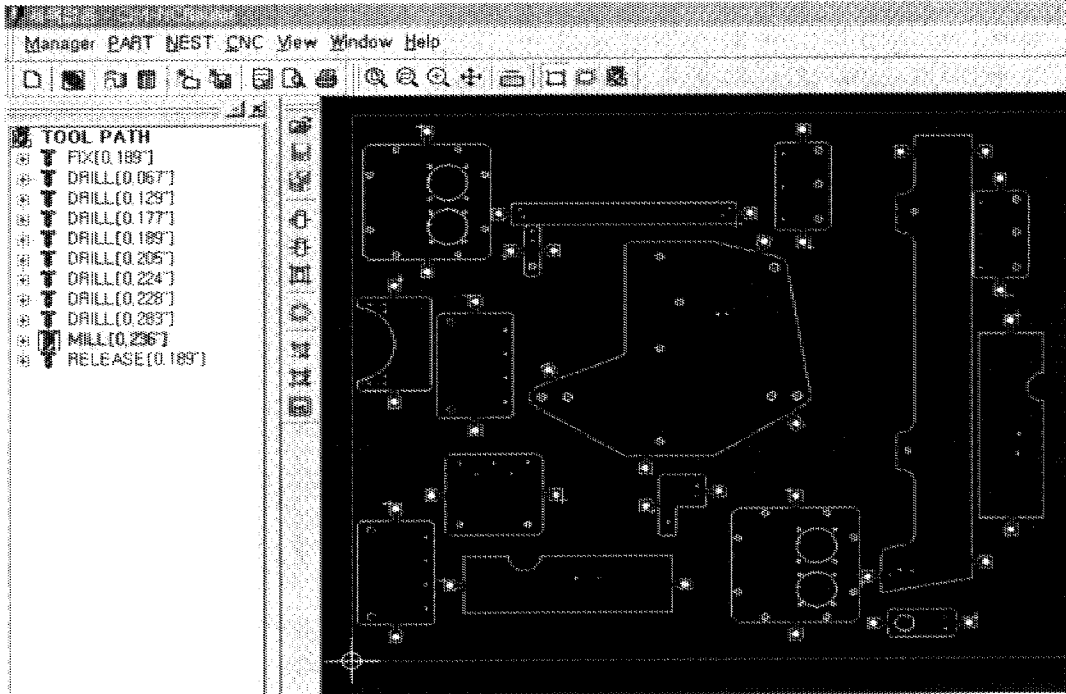


Fig. 4. Sample parts to be cut by CNC router.

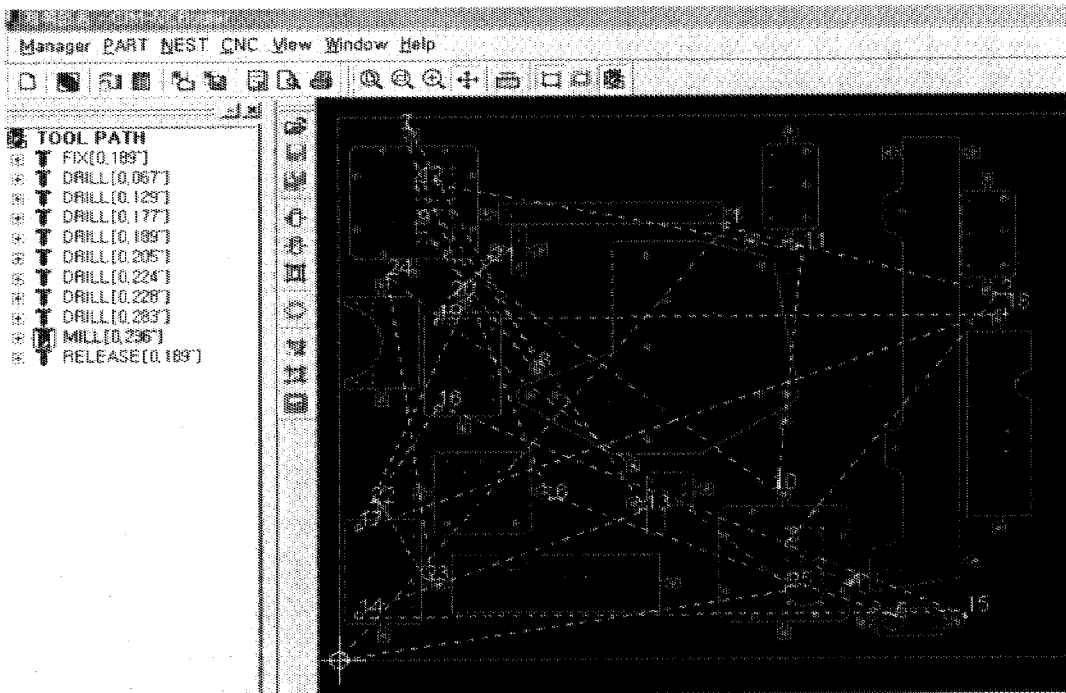


Fig. 5. Initial random path for a milling tool(0.236").

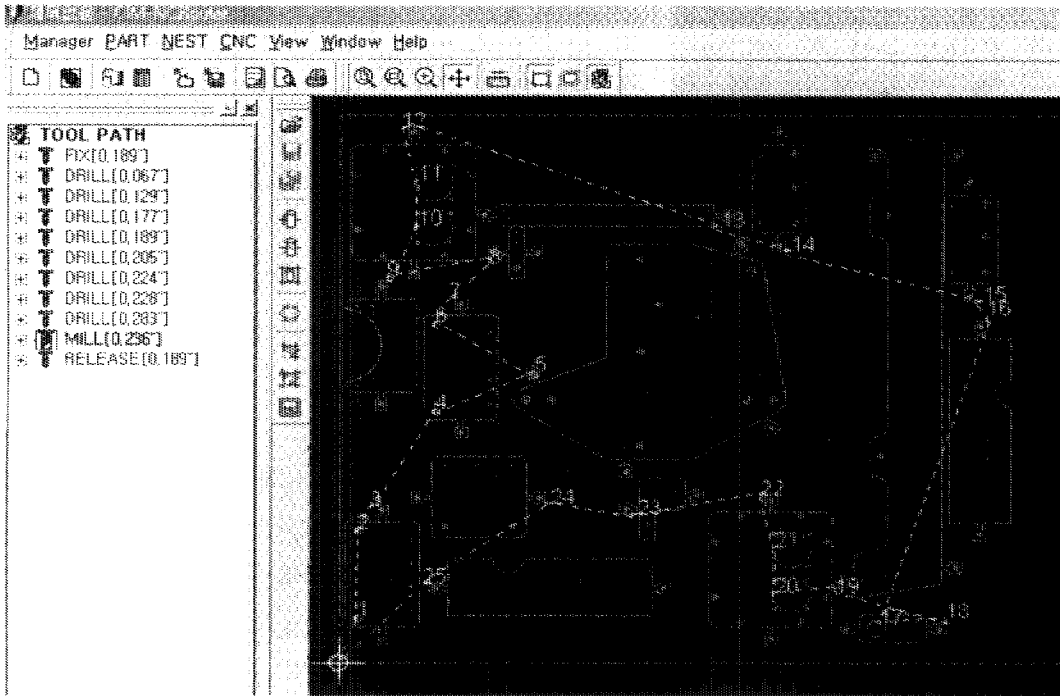


Fig. 6. Optimal path for a milling tool(0.236" dia.).

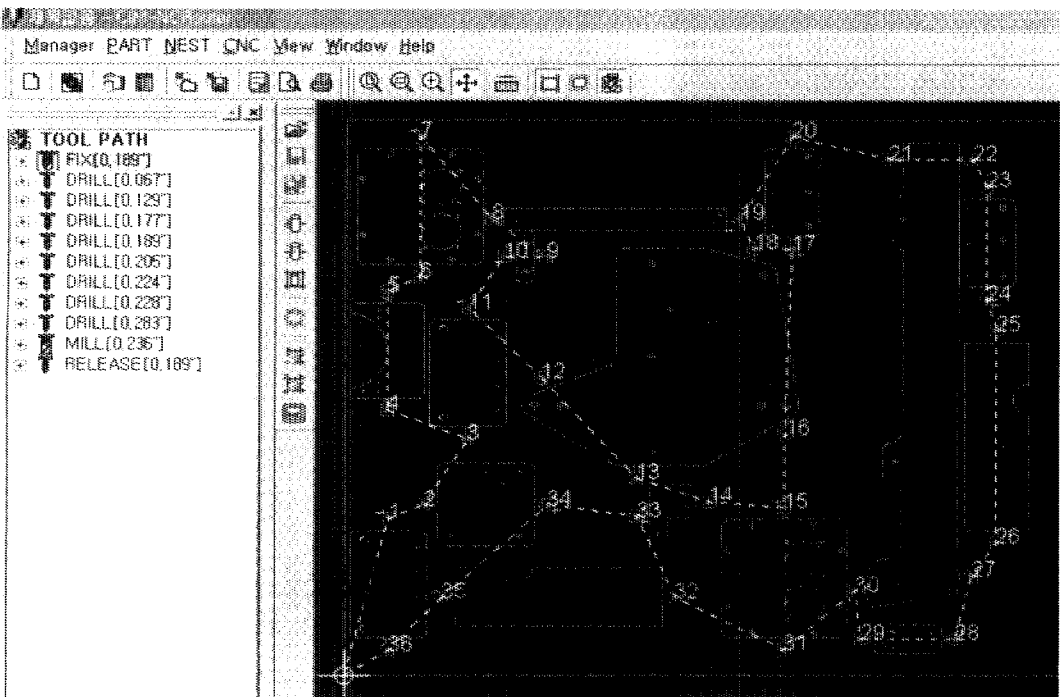


Fig. 7. Optimal path for a riveting tool to fix the parts.

적용 문제마다 이들에 대한 적절한 고려가 요구된다.

출하여 준다.

### III. 결과 및 고찰

Fig. 4는 본 연구에서 개발한 공구경로 자동산출 프로그램을 테스트하기 위하여 준비된 것으로서, 보여지는 형상들을 가공하기 위해서는 드릴링, 리벳팅, 밀링, 리벳제거 등 총 11 가지의 공구경로가 필요한 경우이다.

Fig. 5는 직경 0.236"의 밀링공구를 위한 임의로 생성된 초기경로이고 그림의 경로 위의 숫자는 공구의 방문순서이다. Fig. 6은 Fig. 5의 경로로부터 SA를 이용하여 얻은 최종 경로로서 가공상의 구속조건들이 만족되는 해이다. 즉, Fig. 6에 나타난 경로 중에서 1,2는 3보다 먼저 가공되어야 하는 내부 hole 가공경로이다. 같은 방법으로 10, 11은 12 보다 앞서서, 4, 6은 7보다, 20, 21은 22보다, 17은 18보다 앞서서 가공되어야 하는 경우이고, 그림에서와 같이 이러한 구속조건이 모두 정확히 만족되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 각 부품들을 고정하는 리벳팅 작업의 리벳공구의 최적화된 리벳경로이다. 그림의 왼쪽에 나타난 바와 같이 이 형상들을 CNC router로 가공하기 위해서는 제일 처음 리벳팅 작업으로 각 부품들을 고정(FIX)하고 그 뒤로는 여러 가지 크기의 구멍을 드릴 가공한 후 형상의 내외부를 밀링가공한 후 최종적으로 고정 리벳을 해체하는 작업의 순으로 진행되어야 한다. 본 프로그램에서는 이러한 각 공구별 최적경로의 산출은 물론, 그림에서 나타난 순서에서 보는 바와 같이 공구 상호간의 사용 우선 순위도 함께 고려되어 전체 공구들에 대한 최적경로를 자동으로 산

### IV. 참고문헌

- 1) M.R. Garey and D.S. Johnson, 1979. *Computers and Intractability : A Guide to the Theory of NP-completeness*. W.H. Freeman and Co., U.S.A.
- 2) S. Kirkpatrick, C.D. Gelatt Jr. and M.P. Vecchi, 1983. "Optimization by simulated annealing." *Science* Vol.220, No.4598, pp.671-680
- 3) V. Cerny, 1985. "Thermodynamical Approach to the Traveling Salesman Problem : an Efficient Simulation Algorithm." *J. of Opt. Theory & Appl.* Vol.45, No.1, pp.41-51
- 4) J.A. Bland and G.P. Dawson, 1991. "Tabu search and design optimization." *Computer-Aided Design*, Vol.23, No.3, pp.195-201
- 5) N. Metropolis, A. Rosenbluth, A. Teller and E. Teller, 1953, "Equation of State Calculations by Fast Computing Machines." *J. of Chem. Physics* 21, pp.1087-1092
- 6) P.J.M. Laarhoven and E.H.L. Aarts, 1988. *Simulated Annealing : Theory and Application*. Reidel Publishing Co.
- 7) D.F. Wong, H.W. Leong and C.N. Liu, 1989. *Simulated Annealing for VLSI Design*. Kluwer Academic Publishers
- 8) S. Lin, 1965. "Computer solution of the traveling salesman problems." *Bell Syst. Tech. J.*, Vol.44, pp.2245-2269