

순회 판매원 문제에서 개미 군락 시스템을 이용한 효율적인 경로 탐색

(Efficient Path Search Method using Ant Colony System
in Traveling Salesman Problem)

홍 석 미 [†] 이 영 아 ^{**} 정 태 충 ^{***}
(SeokMi Hong) (young ah Lee) (Tae Choong Chung)

요 약 조합 최적화 문제인 순회 판매원 문제(Traveling Salesman Problem, TSP)를 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)과 Local Search Heuristic인 Lin-Kernighan(LK) Heuristic[1]을 이용하여 접근하는 것은 최적 해를 구하기 위해 널리 알려진 방법이다. 본 논문에서는 TSP 문제를 해결하기 위한 또 다른 접근법으로 ACS(Ant Colony System) 알고리즘을 소개하고 새로운 페로몬 갱신 방법을 제시하고자 한다. ACS 알고리즘은 다수의 개미들이 경로를 만들어 가는 과정에서 각 에지상의 페로몬 정보를 이용하며, 이러한 반복적인 경로 생성 과정을 통해 최적 해를 발견하는 방법이다. ACS 기법의 전역 갱신 단계에서는 생성된 모든 경로들 중 전역 최적 경로에 속한 에지들에 대하여 페로몬을 갱신한다. 그러나 본 논문에서는 전역 갱신 규칙이 적용되기 전에 생성된 모든 에지에 대하여 페로몬을 한번 더 갱신한다. 이 때 페로몬 갱신을 위해 각 에지들의 발생 빈도수를 이용한다. 개미들이 생성한 전체 에지들의 발생 빈도수를 페로몬 정보에 대한 가중치(weight)로 부여함으로써 각 에지들에 대하여 통계적 수치를 페로몬 정보로 제공할 수 있었다. 또한 기존의 ACS 알고리즘보다 더 빠른 속도로 최적 해를 찾아내며 더 많은 에지들이 다음 번 탐색에 활용될 수 있게 함으로써 지역 최적화에 빠지는 것을 방지할 수 있다.

키워드 : ACS, TSP, 빈도수, 가중치, 최적화

Abstract Traveling Salesman Problem(TSP) is a combinational optimization problem, Genetic Algorithm(GA) and Lin-Kernighan(LK) Heuristic[1] that is Local Search Heuristic are one of the most commonly used methods to resolve TSP. In this paper, we introduce ACS(Ant Colony System) Algorithm as another approach to solve TSP and propose a new pheromone updating method. ACS uses pheromone information between cities in the process where many ants make a tour, and is a method to find an optimal solution through recursive tour creation process. At the stage of Global Updating of ACS method, it updates pheromone of edges belonging to global best tour of created all edge. But we perform once more pheromone update about created all edges before global updating rule of original ACS is applied. At this process, we use the frequency of occurrence of each edges to update pheromone. We could offer stochastic value by pheromone about each edges, giving all edges' occurrence frequency as weight about pheromone. This finds an optimal solution faster than existing ACS algorithm and prevent a local optima using more edges in next time search.

Key words : ACS, TSP, frequency, weight, optimal solution

1. 서 론

순회 판매원 문제(Traveling Salesman Problem, 이하 TSP)는 여러 개의 주어진 도시간의 최단거리를 찾는 문제이다. 이 때 각 도시는 반드시 한번만 방문해야 하며, 출발 도시로 다시 돌아와야 한다. 도시간의 거리는 시간이나 비용 등을 이용할 수도 있다. TSP 문제는 Asymmetric TSP와 Symmetric TSP 형태로 나뉘어지는데 본 논문에서는 Symmetric TSP만 다루도록 하겠다. Symmetric TSP가 갖는 제약 조건은 다음과 같다.

[†] 학생회원 : 경희대학교 전자계산공학과
smhong@yahoo.co.kr

^{**} 학생회원 : 경희대학교 컴퓨터공학과
leeyaa@iislab.kyunghee.ac.kr

^{***} 종신회원 : 경희대학교 컴퓨터공학과 교수
tchung@khu.ac.kr

논문접수 : 2002년 12월 27일

심사완료 : 2003년 5월 29일

첫 번째, 경로를 반드시 이루어야 한다.
 두 번째, 모든 도시를 꼭 한번 방문해야 한다.
 세 번째, Distance(A,B) = Distance(B,A)
 즉, n개의 노드 집합과 노드간의 거리가 주어지고, 모든 노드를 정확히 한번 방문하여 최소의 거리를 구하는 문제이다. TSP 문제는 NP-hard 조합 최적화 문제이며, 문제를 풀기 위해서 N 제곱으로 시간이 증가한다. 유전자 알고리즘[2,3], 시뮬레이티드 어닐링[4]과 같은 휴리스틱 기술은 이런 문제에 대하여 합리적인 시간 안에 최적 해를 찾기 위해 많이 제안되었다.

본 논문에서는 ACS에 대하여 소개하고, 기존의 ACS에서 개미들을 이용하여 전역 최적해를 찾는 방법을 개선하고자 한다. 탐색 가능한 에지들을 이용하여 경로를 생성하는 개미들이 최적의 해를 선택하기 위해서는 보다 넓고 다양한 방법으로 에지들을 탐색할 수 있도록 해야 한다. 그러기 위해서는 개미들이 다음 탐색을 위해 활용할 각 에지들의 페로몬 양에 대한 정보가 중요한 역할을 한다. 이에 좀 더 효율적인 탐색 시간과 최적 해를 얻기 위하여 에지의 페로몬 정보를 갱신하는 새로운 방법을 제시하고자 한다.

본 논문은 5장으로 구성되어 있다. : 1장은 논문에 대한 일반적인 개념, 2장에서는 AS(Ant System)과 ACS(Ant Colony System)에 대하여 소개하고, 3장에서는 본 논문에서 제안하고 있는 알고리즘에 대하여 설명한다. 4장에서는 실험 및 결과를 보이며, 마지막으로 5장에서는 결론 및 앞으로의 연구 과제에 대하여 설명한다.

2. 연구 배경

ACS는 기존의 개미 시스템(Ant System, AS)을 기반으로 한 휴리스틱 탐색 알고리즘이다. 실제 개미들은 실질적인 단서 없이 단지 페로몬 정보를 탐색함으로써 그들의 등지[5]에서 먹이가 있는 곳까지 최단 경로를 찾는 능력을 가지고 있다. 개미들은 거의 비슷한 속도로 걸으면서 목적지를 향하여 지나가는 경로에 개미들의 분비물인 페로몬을 분비하고, 그 이후에 지나가는 개미들은 이전에 축적된 페로몬 양을 정보로 경로를 선택한다. 두 지점간의 최단 경로를 찾기 위해 페로몬을 탐색하는 방법이 [그림 1]에 표현되어져 있다[6].

먼저 [그림 1]의 (A)과정에서 개미들은 왼쪽이나 오른쪽을 선택해야 하는 결정 지점에 도달한다. 그들은 최적의 선택을 위해 어떠한 실마리도 가지고 있지 않으므로 임의로 다음 지점을 선택한다. 평균적으로 반은 왼쪽, 반은 오른쪽으로 선택한다고 생각할 수 있다. [그림 1]의 (B)와 (C)는 모든 개미들이 계속해서 같은 속도로 움직이는 과정을 보여주고 있다. 그어진 선의 수는 개미

들이 쌓아놓은 페로몬의 양에 비례한다. 아래쪽 길이 위쪽 길보다 더 짧기 때문에, 평균적으로 더 많은 개미들이 아래쪽 길을 방문하게 될 것이며 이 경로 상에는 페로몬이 더 빨리 쌓이게 된다. 잠시 후 두 경로에 축적된 페로몬의 양은 시스템에 들어오는 새로운 개미의 결정에 영향을 줄만큼 큰 차이를 보이게 된다(그림 1D).

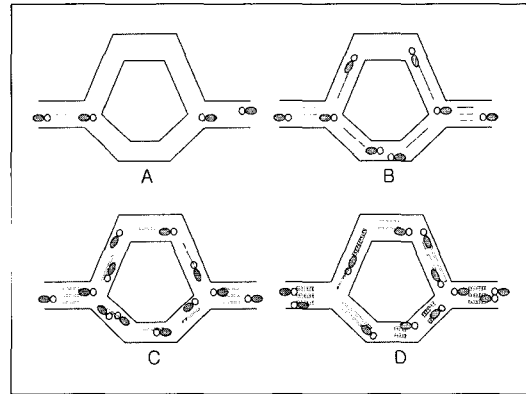


그림 1 개미 시스템의 형태

앞으로 새로운 개미들은 결정 지점에서 아래쪽 길이 더 많은 양의 페로몬을 보고, 아래쪽 길을 선택할 가능성이 높아진다. 곧 모든 개미들이 더 짧은 경로를 사용하게 될 것이다. AS는 인위적으로 적용시키는 개미들이 그래프의 에지에 축적되어 있는 페로몬을 통해 서로의 정보를 교환함으로써 문제의 해를 풀어나가는 알고리즘으로 TSP문제[7,8] 이차배정 문제[9]와 같은 조합 최적화 문제에 적용되어진다. 그러나 AS는 개미들이 짧은 에지가 있으면 그것만을 선택하고자 하는 성질로 인하여 지역 최적화에 빠질 확률이 높기 때문에 Ant Colony System(ACS)이 새롭게 대두되었다. ACS는 개미들이 지나가는 경로에 페로몬을 축적하는 과정 외에, 에지가 전역 최적 경로에 속해있지 않으면 현재 축적되어 있는 페로몬의 양을 상쇄시키는 과정을 추가하였다.

ACS는 상태 전이 규칙(State Transition Rule), 지역 갱신 규칙(Local Updating Rule), 전역 갱신 규칙(Global Updating Rule)과 같은 과정을 각각의 개미들이 생성한 경로에 적용시킴으로써 가능한 한 지역 최적화에 빠지지 않고, 탐색의 범위를 보다 넓고 다양하게 검색하고 더욱 효율적으로 최적의 해를 찾도록 구성되어 있다. [그림 2]는 ACS 알고리즘의 수행 과정을 간략화한 것이다.

먼저 초기화 규칙(예를 들어, 임의의 선택 등)에 따라 개미들이 주어진 각 도시에 각각 놓여진다. 그러면 각

```

Loop
  각 개미들이 초기 노드에 놓여짐
  Loop
    각 개미들의 경로 생성을 위해 상태 전이 규칙 적용
    지역 갱신 규칙 적용
  Until 모든 개미들이 완전한 해를 생성할 때까지 반복
  전역 최적 경로 선택
  전역 갱신 규칙 적용
Until (종료 규칙)

```

그림 2 ACS 알고리즘

개미들은 상태 전이 규칙을 반복적으로 적용함으로써 경로를 생성한다. 경로를 생성하는 과정에서 지역 갱신 규칙을 이용하여 방문한 에지 상의 페로몬 양을 수정한다. 모든 개미들이 각각의 경로를 완성한 후 생성된 경로들 중 가장 짧은 경로를 갖는 전역 최적 경로를 선택한다. 전역 최적 경로에 속하는 에지들에 대해 전역 갱신 규칙을 적용하여 에지들의 페로몬 양을 다시 한번 갱신한다. 페로몬 갱신 규칙은 개미들이 경로 탐색 과정에서 탐색해야 하는 에지들에 대해 더 많은 정보를 주려는 의도에 설계되어진 것이다.

3. 제안한 방법

기존의 ACS는 개미들의 탐색 과정에서 각 사이클마다 지역 갱신 규칙과 전역 갱신 규칙을 이용해서 에지들의 페로몬 양을 갱신한다. 그리고 다음 탐색에서 개미들은 갱신된 에지의 페로몬 정보를 이용하여 새로운 경로를 탐색한다. ACS에서 사용하는 전역 갱신 규칙은 다음과 같다.

$$\tau(r,s) \leftarrow (1-\alpha) \times \tau(r,s) + \alpha \times \Delta\tau(r,s)$$

$$\text{where } \Delta\tau(r,s) = \begin{cases} (L_{gb})^{-1}, & \text{if } (r,s) \in \text{global best tour} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$0 < \alpha < 1$: 페로몬 상쇄 파라미터

L_{gb} : 시작 지점으로부터 가장 최적의 경로 길이

α 는 페로몬 상쇄 파라미터, L_{gb} 는 현재까지의 전역 최적 경로 길이이다. $\tau(r,s)$ 는 도시 r 과 도시 s 사이의 페로몬의 양, $\Delta\tau(r,s)$ 는 에지 r, s 가 전역 최적 경로에 속해 있으면 $(1/L_{gb})$, 그렇지 않으면 0으로 주어진다. 결국 상쇄 파라미터 α 에 의해 페로몬의 양이 줄어들게 된다. ACS의 경우 각 사이클마다 전역 최적 해를 찾는 과정에서 전역 최적 경로에 속하는 에지에 대해서만 페로몬의 정보를 갱신하며, 해당 사이클에 전역 최적 경로가 없으면 탐색된 경로상의 어떠한 에지의 페로몬 양도 갱신하지 않는다.

본 논문에서는 기존 ACS에서 전역 갱신 규칙을 수행하기 전 한번 더 페로몬 갱신 과정을 수행한다. 모든 개미들의 탐색 경로가 완성되는 각 사이클마다 생성된 모

든 에지에 대하여 에지들의 발생 빈도수를 계산하고, 그 값을 페로몬 정보 갱신에 이용한다. 그럼으로써 보다 통계적인 값을 가중치로 적용할 수 있다. 또한 기존의 ACS가 전역 최적 경로(탐색을 거치면서 얻어진 현재의 최적 경로)에 속하는 에지들에 대해서만 페로몬을 갱신하는 방법과 비교해 모든 에지들에 대해 페로몬을 갱신함으로써 좀 더 많은 에지가 다음 경로 탐색에서 선택되어질 기회를 높여주었다. 그러므로 후에 개미들이 새로운 경로를 구성할 때, 지역 최적화에 빠지지 않고 더 나은 에지를 선택할 확률을 높게 만든다. 또한 최적 해를 찾는데 있어서 수렴 속도를 증가시킴으로써 탐색 시간을 줄일 수 있다. 이러한 페로몬 갱신은 개미들의 경로 생성 시 전역 최적 경로가 있는지 여부를 조사하는 전역 갱신 과정에서 수행된다. 본 논문에서 제시한 에지의 발생 빈도를 이용한 페로몬을 부여 방법은 [그림 3]과 같다.

```

Procedure Pheromone_Updating_Using_Frequency
begin
  For k:=0 to m do // k : 개미의 수
    P(rk, sk) := P(rk, sk) + (NumOfEdge[rk][sk]/AntNum)
  End-for;
end;

```

그림 3 에지에 대한 빈도수를 사용한 가중치 부여 방법

비록 개미수 * 도시수 만큼의 루프가 더 수행되지만, 개미들이 다음 선택에서 더 나은 에지들의 선택 확률을 높임으로써 더 빠른 시간 내에 최적 해에 접근해 갈 수 있다. 본 연구실에서는 과거에 각 개미들이 생성한 경로들을 우성과 열성으로 구분하고 우성에 대해서 전역 갱신 규칙에 기반하여 가중치를 부여하여 에지들의 선택 확률을 높게 하는 방법을 수행하였다. 이 방법은 도시의 수가 적은 경우에는 기존의 ACS 방법보다 좋은 결과를 보였으나 도시의 수가 많아질수록 항상 좋은 결과를 보이지는 못했다. 그 이유는 도시간의 특성에 대한 고려가 부족하였고, 우성과 열성의 구분에 대한 기준이 고정되어 있기 때문이다. 이에 본 논문에서는 발생 에지들의 빈도수를 계산하는데 있어서 생성된 경로들의 일정 비율만 고려한 것이 아니라 개미 수만큼 생성된 전체 경로들을 대상으로 하였다. [그림 4]는 기존의 ACS 알고리즘의 전역 갱신 부분에서 Pheromone_Updating_Using_Frequency Procedure가 추가된 모습을 보이고 있다.

4. 실험 및 결과

본 논문에서 제안하고 있는 ACS(Frequency) 방법을

```

procedure Global Updating Rule
begin
  For k:=1 to m do
    Compute Lk /* Lk : 개미 k에 의해 만들어진 경로의 길이
  End-for;
  Begin
    Pheromone_Updating_Using_Frequency procedure 수행
  end;
  Compute Lbest;
  For each edge (r,s)
    T(rk, sk) := (1-a)T(rk, sk) + a(Lbest)-1
  End-for;
end;
    
```

그림 4 본 논문에서 제안된 전역 갱신 규칙

실험하기 위해서 사용된 환경은 Windows XP(Pentium IV 1.8GHz, 256M)이고, 프로그램은 C언어로 구현하였다. 도시의 위치들은 TSP 예제로 널리 알려진 TSPLIB에서 추출하여 사용하였다. 사용된 데이터 파일은 Rat60, EIL101, RAT195, kroA200, TSP225, GIL262이다. 각 개미들은 한 루프당 100000번씩 반복적인 탐색을 통해 최적 경로를 발견하도록 하였다. 이와 같은 루프는 각 파일에 대하여 5번씩 실험하여 평균값과 최적값을 산출하였다. 실험에 사용된 개미의 숫자는 기존의 ACS 논문에서 알려지고 널리 사용되는 10마리로 정하였다.

[그림 5]는 EIL101 파일을 이용한 실험 결과를 보이고 있다. 점선으로 표시된 것은 ACS 알고리즘의 기울기이고, 실선으로 표시된 것은 ACS(Frequency)의 기울기를 나타내고 있다. y축은 각 개미들이 만들어 내는 최적의 경로 길이의 변화이고, x축은 개미들이 해를 얻기 위해 경로를 탐색한 탐색 횟수를 나타낸다.

기존의 ACS에 비해 빠른 속도로 수렴해가면서 더 좋은 해를 찾고 있음을 볼 수 있다. 기존의 ACS 방법의 전역 갱신 과정에서 개미들에 의해 생성된 모든 에지들에 대해 추가적인 페로몬의 증가 과정을 두었다. 그럼으로써 다음 탐색에 있어서 보다 많은 에지의 탐색이 가능하므로 다양한 형태의 경로 탐색이 용이하였다. 그리고 최적 해를 찾는데 있어서도 더 빠르게 수렴할 수 있도록 하였다.

표 1은 여러 가지 파일을 이용하여 실험한 기존의

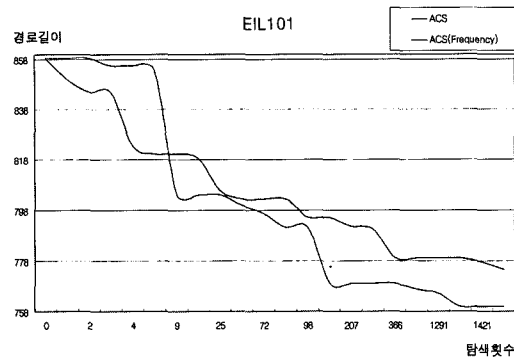


그림 5 EIL101에서 ACS와 ACS(Frequency)의 비교

ACS 알고리즘과 본 논문에서 제안하고 있는 ACS(Frequency)의 비교표이다. Average Len.은 전체 실험에서 얻어진 평균 탐색 길이, 그 중 최적의 탐색 길이가 Best Len.이다. 그리고 Frequency는 100000번 중 최적해를 찾는데 걸린 탐색 횟수이다. 표에서 보여지는 바와 같이 ACS(Frequency)가 기존의 ACS보다 더 좋은 해를 더 빨리 찾고 있음을 볼 수 있다. 이는 ACS(Frequency)가 생성된 모든 경로 상에 있는 각 에지들의 발생 빈도수를 페로몬의 정보로 이용하여 보다 많은 에지들을 다음 탐색에 참여시킴으로써 지역 최적화에 빠지지 않고 좋은 해를 얻을 수 있었다.

5. 결론 및 앞으로의 연구 방향

본 논문에서는 기존의 ACS 알고리즘의 전역 갱신 과정 중 개미들의 경로 탐색에 활용되는 페로몬 정보 갱신 과정을 새로이 제시하였다. 기존 ACS에서 전역 갱신 규칙을 수행하기 전 작업으로 페로몬 갱신 과정을 추가함으로써 최적 해로의 수렴 속도를 증진시킬 수 있었다. 이때 각 에지들의 생성된 모든 경로 상에서 발생 빈도수가 페로몬 갱신을 위해 사용되는데 이는 기존의 방법들보다 더 많은 에지들이 다음 탐색에 활용될 수 있게 하였다. 그럼으로써 탐색 시 지역 최적화에 빠지는 것을 방지할 수 있으며, 보다 통계적인 값을 페로몬 값으로 활용할 수 있다. 또한 좋은 해로의 수렴속도가 빨

표 1 기존의 ACS 알고리즘과 새로 제안된 ACS(Frequency) 결과 비교

algorithm	Existing ACS			ACS(Weighted)		
	Average Len.	Best Len.	Frequency	Average Len.	Best Len.	Frequency
Rat60	828.6104	825.5066	5411	813.8269	803.2768	5654
EIL101	774.2266	773.6146	1653	767.7732	759.9277	1322
RAT195	2845.3224	2829.8564	5152	2792.0697	2739.6311	4281
kroA200	38301.6928	37369.3789	3465	37564.2760	37471.0546	42
TSP225	4911.1767	4889.6708	2174	4907.2478	4875.9057	1657
GIL262	3004.1870	3001.0556	431	3002.0740	3000.3935	139

라지는 것을 볼 수 있었다. 기존의 ACS 알고리즘과 본 논문에서 제안한 ACS(Frequency) 방법을 같은 환경에서 실험하였다. 실험 결과, ACS(Frequency)가 더 좋은 해를 찾아냈음을 볼 수 있고 또한 수렴 속도 면에 있어서도 기존의 방법보다 빠름을 볼 수 있다.

위에서 보여진 결과와 같이 추가적인 페로몬의 증가가 수렴 속도를 증진시킨다는 점에서는 좋으나 급격한 페로몬 값의 증가로 인하여 도시수가 적은 경우에는 폭넓은 탐색이 이루어지지 못할 수도 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 보다 많은 에지들을 탐색에 활용할 수 있고, 탐색 도시간의 특성을 고려할 수 있는 가중치 부여 방법을 제시한다면 더 좋은 결과를 보일 수 있을 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

- [1] S.Lin and B.W. Kernighan, "An Effective Heuristic Algorithm for the Traveling Salesman Problem," Bell Telephone Laboratories, Incorporated, Murray Hill, N.J.-1971.
- [2] MICHALEWICZ, "유전자 알고리즘, 공성곤 외 4인 공역, 그린출판사.
- [3] 기타로 히로야키, "유전자 알고리즘, 조성배 역, 대청출판사.
- [4] V.J Rayward-smith, C.R. Reeves, G.D. Smith, "Modern Heuristic Search Methods," John Wiley & Sons Ltd., 1996.
- [5] R.Beckers, J.L. Deneubourg, and S. Goss, "Trails and U-turns in the selection of the shortest path by the ant *Lasius Niger*," Journal of Theoretical Biology, vol. 159, pp. 397-415, 1992.
- [6] L.M. Gambardella and M.Dorigo, "Ant Colony System : A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem," IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 1, No. 1, 1997.
- [7] A.Coloni, M.Dorigo, and V.Maniezzo, "Distributed optimization by ant colonies," Proceedings of ECAL91-European Conference on Artificial Life, Paris, France, F.Varela and P.Bourgine(Eds.), Elsevier Publishing, pp.134-142, 1991.
- [8] B. Freisleben and P. Merz, "Genetic local search algorithm for solving symmetric and asymmetric traveling salesman problems," Proceedings of IEEE International Conference of Evolutionary Computation, IEEE-EC96, IEEE Press, pp.616-621, 1996.
- [9] V.Maniezzo, A.Coloni, and M.Dorigo, "The ant system applied to the quadratic assignment problem," Rep. IPIDIA 94-28, Universite Libre de Bruxelles, Belgium., 1994.



홍 석 미

1994년 상지대학교 전자계산학과 졸업(이학사). 1997년 경희대학교 대학원 전자계산공학과(공학석사). 1998년~현재 경희대학교 대학원 전자계산공학과 박사과정. 관심분야는 기계학습, 데이터마이닝, 에이전트, 정보보호, 최적화



이 영 아

1992년 동덕여자대학교 전자계산학과 졸업(학사). 1994년 동덕여자대학교 대학원 전자계산학과(공학석사). 1999년~현재 경희대학교 대학원 컴퓨터공학과 박사과정. 관심분야는 강화학습, 에이전트, 퍼지이론, 데이터마이닝, 최적화



정 태 중

1980년 서울대학교 전자공학과(학사) 1982년 한국 과학 기술원 전자공학전공(공학석사). 1987년 한국 과학 기술원 전자공학전공(공학박사). 1987년~1988년 KIST 시스템 공학센터 선임연구원 1988년~현재 경희대학교 컴퓨터공학과 교수. 관심분야는 기계학습, 보안, 최적화, 에이전트