

# 도심 도로망에서 시간-거리 균형경로 탐색 알고리즘

금비<sup>o</sup> 조환규

부산대학교 정보컴퓨터공학부

rmaql0106@pusan.ac.kr, hgcho@pusan.ac.kr

## Time-Distance Balanced Path Finding Algorithms in Urban Road Networks

Bee Geum<sup>o</sup> Hwan-Gue Cho

Department of Computer Science and Engineering, Pusan National University

### 요 약

도심 도로망에서 목적지까지의 적절한 경로(path)를 찾아내는 것은 매우 중요한 연구주제이다. 다익스트라의 최단거리 알고리즘은 두 지점 간의 최단거리를 찾아주는 가장 대표적인 그래프 알고리즘이다. 그러나 도심 도로망의 경로 탐색에서는 단순히 이동 거리를 최소화하는 것보다 이동 시간을 최소화하는 것이 더 실용적이다. 왜냐하면 도심에서 차량 지연의 가장 큰 요인은 교차로에서의 대기 시간이다. 따라서 최단거리가 보장되는 경로가 아니라, 가장 빠른 최단시간 경로, 즉 quickest path가 더 유용한 경로이다. 본 연구에는 도심 도로망의 두 지점을 연결하는 최단거리 경로와 최단시간 경로를 바탕으로 최단거리 경로보다 더 긴 거리이지만 그보다 더 빠른 시간을 보장하고, 최단시간 경로보다 시간은 더 걸리지만 이동 거리는 그보다 더 짧은 중간 단계의 경로, 즉 시간-거리 면에서 균형이 보장되는 새로운 경로를 찾아내는 알고리즘을 제시한다. 이 기준으로 대표적인 도심에서 최단거리 경로, 최단시간 경로, 그리고 이 둘을 기반으로 새롭게 구성한 균형경로(balanced path)의 특성을 살펴본다.

### 1. 연구동기

도심 도로망에서 운전자가 목적지에 도달하기 위하여 경로를 선택하는 것은 간단하지 않다[1]. 일반적으로 가중치 그래프에서 최단거리(shortest path) 알고리즘과 다양한 변형 경로가 응용되고 있지만 현실에서 최단거리는 그다지 유용한 정보가 아니다. 왜냐하면 도심에서 이동할 경우, 운전자에게 중요한 것은 실제 움직인 경로의 길이가 아니라 도착지까지의 시간이다. 도심에서의 이동시간에서 대부분을 차지하는 요소는, 도로를 달리는 시간이 아니라 교차로에서 다음 신호를 기다리는 시간이다. 예를 들어 서울 강남이나 부산 해운대 신도시의 경우 이동 경로의 거리는 짧지만, 그 사이에 수많은 교차로가 존재하여 어떤 경우에는 도보로 이동하는 것보다 더 긴 시간을 교차로에서 대기 상태로 보내야 한다. 따라서 도시의 운전자들은 단순히 공간상으로 짧은 경로보다는 중간 교차로가 적은 경로, 또는 가장 적은 turn이 보장되는 경로[2,3]를 선호한다. 이렇게 운전자의 인지과정까지 고려한 경로를 “최단순 경로(simplest path)”라고 말한다[4,5].

본 연구에서는 우리나라의 대표적인 10개 도시에 대하여 (출발, 도착) 정점 쌍에 대하여 최단거리 경로와 최단시간 경로를 비교하여 이를 기준으로 도로망의 안정성과 효율성을 비교하고자 한다. 단, 이 계산에서 각 교차로에서의 대기 시간은 모두 동일한 조건으로 계산하였다. 즉 주말, 주중 오전, 오후 퇴근 시간에 따른 차이는 고려하지 않았다. 그 다음으로는 출발점  $s$ 에서 도착지  $t$ 까지의 최단시간 경로  $P_{time}$ , 최단거리 경로  $P_{length}$ 가 주어질 때 이 두 극단의 (시간, 거리) 조건의 균형을 보장하는 새로운 경로, 즉 시간-거리 균형경로(time-distance balanced path)를 구하는 알고리즘을 제시한다. 즉 최단거리 경로보다 거리는 늘어나지만 그 경로를 지나가는 시간은 더 짧고, 최단시간 경로보다 시간 면에서는 더 늘어나지만 경로 면에서는 더 짧은 경로를 보장하는 것이 균형경로다.

### 2. 도심 도로망의 비교 분석

본 논문에서는 도심 도로망에서의 최단거리 경로와 최단시간 경로를 구하기 위해 국가교통정보센터에서 제공하는 표준노드링크 데이터를 이용하였다. 최단거리 경로와 최단시간 경로를 구할 때, 다익스트라 최단거리 알고리즘을 이용하였다. 최단시간 경로를 구하기 위해서  $M = w + k(d - 2)$  방정식을 세웠다.  $M$ 은 총 걸린 시간,  $w$ 는 평균대기 시간으로 20초로 설정했다.  $d$ 는 vertex(교차로)의 degree를 나타내고, degree가 2보다 작은 경우에는  $(d - 2)$ 가 0이 되도록 설정했다.  $k$ 는 교차로에서 기다리는 평균대기 시간으로 30초로 설정했다.

임의의 출발점  $s$ 에서 도착지  $t$ 까지의 이동 거리가 짧을수록,  $s$ 에서  $t$ 까지의 이동 시간이 짧은 것은 누구나 이해할 법한 사실이다. 하지만, 이동 경로의 거리 자체는 짧지만 그 경로에 수많은 교차로가 존재하는 경우와 이동 경로의 거리가 더 길지만, 해당 경로에 존재하는 교차로의 개수가 앞서 말한 경로보다 적은 경우를 비교해보면, 교차로의 개수가 더 적은 경로가 시간적인 면에서 유리할 수 있다. 그러므로 우리는 앞서 세운 방정식과 다익스트라의 최단거리 알고리즘을 이용해 10개 도시의 모든 vertex(교차로)쌍에 대해 최단거리 경로의 거리와 시간, 최단시간 경로의 거리와 시간, 각 경로의 HOP을 측정했다.

다음 표 1은 한국의 주요 10개 대도시의 정보, vertex 수 (Vertices, 지도상에서 교차로, intersection)와 1500m 이상의 거리를 기준으로 최단거리 경로를 이동할 때 걸리는 시간 (SPT)과, 최단시간 경로를 이동할 때 걸리는 시간 (QPT)의 차이가 1분 이상인 경로의 비율을  $R$ 로 나타낸 것이다. 즉  $R$ 값이 높다는 것은 직관적으로 선택하는 경로가 아니라 다른 방법으로 선택한 경로를 따라가야 한다는 것으로 이것은 도시 도로망의 품질을 평가하는 중요한 지표가 될 수 있다. 이 논문에서 도로망 그래프의 vertex는 각 교차로

(intersection)점을 의미한다. 해당 도로망에서 vertex의 개수에 따른 R의 값을 linear regression한 경우 우리는  $f(x) = 0.003x + 79.38$ 의 함수를 찾을 수 있었다. 이 함수의 의미는 도시의 규모(Vertex의 개수)가 클수록, 최단거리 경로에서의 길이는 시간과 최단시간 경로에서의 길이는 시간의 차이가 크다는 것을 의미한다. 예로 부산 강서구의 경우 vertex의 개수가 1514개로 부산에서 가장 많았으며, R도 65.9%로 가장 컸다.

도시	V	R	도시	V	R
서울	8922	98.2	대전	3513	91.8
부산	5740	95.9	울산	5527	94.2
대구	5577	94.9	세종	2056	83.3
인천	5614	93.9	제주	4218	89.1
광주	5370	94.1	창원	563	77.8

표 1 10개 도시의 교차로(V)의 수와 최단 거리/시간 비율

아래의 그림-1과 그림-2에서, 보라색은 최단거리 경로와 최단시간 경로가 겹치는 경로(Overlap path), 빨간색은 최단거리 경로(Shortest path), 파란색은 최단시간 경로(Quickest path)를 나타낸다. |HOP|은 어느 특정한 경로의 Edge(이웃한 교차로를 연결하는 도로) 개수를 나타낸다. Distance Difference는 최단시간 경로의 거리와 최단거리 경로의 거리 차이를 나타낸다.



그림-1. 강남구 최단거리, 최단시간 경로



그림2. 부산 해운대구 최단거리, 최단시간 경로

### 3. 균형경로(Balanced Path) 탐색 알고리즘

두 지점(s,t)에 대하여 우리는 최단거리 경로(shortest path)와 최단시간 경로(quickest path)를 구할 수 있다. 이 두 극단(시간과 길이)경로에 대하여 그 중간의 값을 가지는 경로를 balanced path라고 정의한다. 즉 균형 경로는 최단거리 경로와 비교하면 거리는 늘어나지만 시간은 더 짧고, 최단시간 경로에 비하여 시간은 더 늘어나지만 경로는 더 짧은 거리를 의미한다. 도로 주행에서 경로 길이는 실제 소비되는 연료와 연관이 되므로 이를 고려하는 것은 중요한 문제이다.

두 지점(s,t)에 대하여 최단거리 경로와 최단시간 경로의 대응구조는 4개로 구별할 수 있다. 아래 그림에서 초록색은 최단시간 경로, 주황색은 최단거리 경로를 의미하며, 파란색 점선은 두 경로에서 공통되는 부분이다.

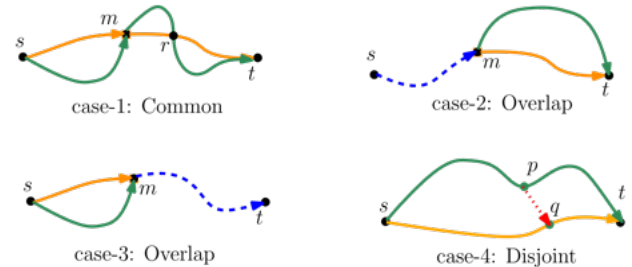


그림-3. 최단거리, 최단시간 경로와 균형 경로

case-1과 같이 s, t가 아닌 어떤 두 정점 m, r에서 두 경로가 Edge Disjoint한 경로를 가지는 경로에는 최단거리, 최단시간 경로에 다른 중간경로 path(m, r)를 대치하면 균형경로를 만들 수 있다. 만일 case-2, case-3과 같이 시작과 끝점에서 두 경로가 중첩(Overlap)되고 그 다음에는 시작점 s와 끝점 t에 대하여 Edge Disjoint한 경로가 존재하면 이 문제는 다시 그 중첩이 끝나는 점에서 다시 끝점 t나 s에서 m까지의 균형 경로를 찾아야 한다.

마지막으로 case-4와 같이 두 경로에 어떤 vertex, edge도 시작점, 끝점인 s, t와 공유하지 않는다면 그림에서 보인 바와 같이 두 경로의 특정 두 점을 연결하는 가장 짧은 경로를 찾아서 이 경로가 균형경로를 대신할 수 있는지를 살펴봐야 한다. case-4에서 만일 그 두 정점이 p, q라고 하고 이 path(p, q)를 지나는 경로가 최단거리 경로의 시간보다 짧아지면 이 경로 path(p, q)를 포함하는 균형경로를 찾을 수 있다. 이 문제는 k-shortest path를 구하는 문제로도 해결할 수 있지만, 이 경우 복잡도는  $O(|V|^3)$ 인데 비하여, shortest path와 quickest path가 주어진 상황에서 만일 이미 모든 쌍에 대하여 최단거리 경로 값과 최단시간 경로 값을 알고 있다면 균형 경로는  $O(|P|)$ 에 구할 수 있다. 일반적으로  $|V| = N$ 이라고 할 때 대부분의 평면 그래프(Plane graph)에서 shortest path를 이루는 edge의 order는  $O(\sqrt{N})$ 이므로 Yen의 k-shortest path 알고리즘에 비해 매우 효율적이다.

아래의 그림-4는 그림-3의 case-1에 해당하는 경우다.

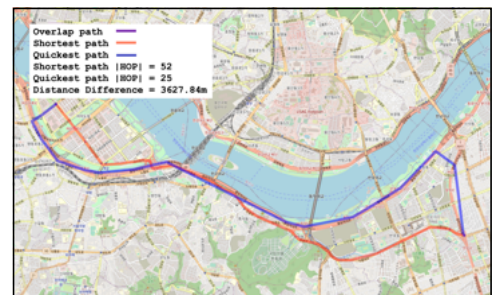


그림-4 case-1의 예시

그림-5는 그림-3의 case-2, case-3에 해당하는 경우이고, 그림-6은 그림-3의 case-4에 해당하는 경우이다.

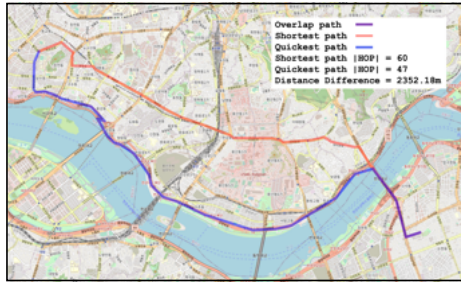


그림-5 case-2, case-3의 예시

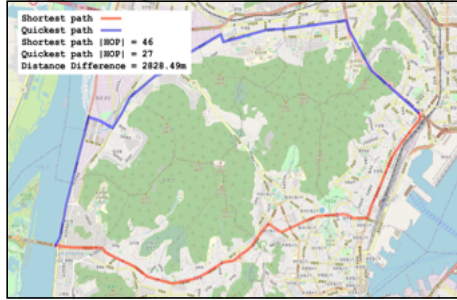


그림-6 case-4의 예시

#### 4. 10개 주요 도시 대상으로의 실제 평가 실험

다음 그림-7, 그림-8은 앞서 살펴보았던 서울 강남구와 부산 해운대구에 균형경로 탐색 알고리즘을 적용한 결과이다. 아래 그림에서 검은색으로 표시된 부분이 균형경로(Balanced path)다.



그림-7 서울 강남구 균형경로

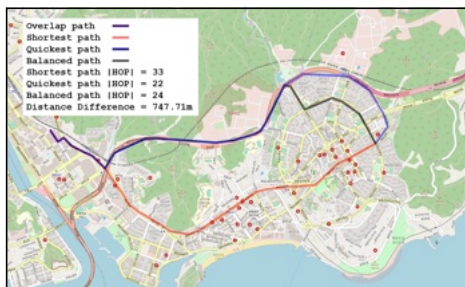


그림-8 부산 해운대구 균형경로

10개 도시를 대상으로 최단거리 경로와 최단시간 경로의 차이가 20% 이상인 퍼센테이지를 측정한 결과, 서울이 81.0%로 가장 높았고, 제주가 10.2%로 가장 낮은 결과값을 보였다. 결과값이 낮을수록, 우회해서 이동할 경로가 부족하다는 뜻이다.

그림-9에서 보듯이 제주도는 한라산을 중심으로 도로 교통망이 생겨났기 때문에 이러한 결과가 나왔다.

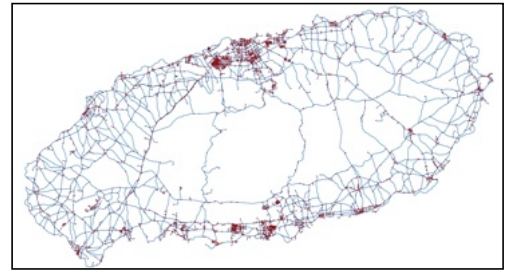


그림-9 제주도 도로 교통망

#### 5. 결론과 추후 연구

- 최단거리 경로와 최단시간 경로가 주어진 경우 이 둘을 적절히 보완할 수 있는 "균형경로(balanced path)"는  $O(\sqrt{N})$ 에 생성할 수 있다.
- 도시의 규모(Vertex의 개수)가 클수록 최단거리 경로 시간과 최단시간 경로 시간의 차이가 크다.
- 10개 도시 중 Vertex의 개수가 두 번째로 많은 도시인 부산이 최단거리 경로와 최단시간 경로의 차이가 20% 이상인 퍼센테이지의 결과값이 7위에 그쳤다.
- 제주도는 한라산을 관통하는 도로의 효과로 최단거리, 최단시간 차이 비율이 가장 낮았다.

그리고 추후 연구과제는 다음과 같다.

- 균형 경로의 수는 충분히 많을 수 있으므로 이 중에서 사용자가 그 중 적절한 비율로 선택할 수 있도록 하는 연구가 필요하다.
- $(s, t)$  경로에  $k$ 개의 차량이 이동할 때 적절한 수준으로 edge disjoint, vertex disjoint한 경로를 찾는 문제. 이 문제는 특정 도로에 차량 정체가 일어나지 않도록 보장하는 game theory적 경로 탐색문제이다.

#### Acknowledgement

본 연구는 중소벤처기업부에서 지원하는 2021년도 산학연협력 기술개발사업(No.S3104339)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

#### 참고문헌(References)

- [1] Reginald G. "Path selection and route preference in human navigation: A progress report.", Proc. of COSIT'95, pp.21-23, 1995.
- [2] Z. Yan *et al.* "A fewest-turn-and-shortest path algorithm based on breadth-first search." Geo-Spatial info. science 17.4 pp.201-207, 2014.
- [3] J. Bin and X. Liu. "Computing the fewest-turn map directions based on the connectivity of natural roads." J. Geo. Inf. Sci. pp.1069-1082, 2011.
- [4] D. Matt and L.Kulik. "Simplest paths: automated route selection for navigation." Proc. of COSIT, 2013.
- [5] H. John *et al*, M. Maxel and S. Suri. "Finding the k shortest simple paths: A new algorithm and its implementation." ACM Transactions on Algorithms pp.45-es, 2014.