

균형경로 모형을 이용한 도로망 특성 분석

금비[°], 조환규
부산대학교 정보컴퓨터공학부
{rmaql0106, hgcho}@pusan.ac.kr

Road Network Characteristic Analysis Using the Balanced Path Model

Bee Geum[°], Hwan-Gue Cho
Department of Computer Science and Engineering, Pusan National University

요약

4차 산업혁명에서 자율주행 자동차의 운행의 안정성과 효율성을 위한 도로망 품질 평가는 매우 중요한 주제이다. 두 지점 간의 최단거리 경로와 최단시간 경로를 이용해 도로망의 품질 평가에 대한 연구가 진행되어 왔다. 하지만 이 두 가지 경로만이 도로망 품질 평가에서 중요한 척도는 아니다. 실제 도심 도로망에서 운전자는 다양한 상황 속에서 경로를 선택한다. 예를 들어 운전자는 심리적으로 도로 폭이 좁은 길보다는 폭이 넓은 길을 선택하고, 자연재해나 도로 공사 등 여러 가지 이유로 인해 특정 경로를 이용할 수 없는 경우 우회 경로를 선택한다. 그러므로, 우리는 최단거리 경로와 최단시간 경로를 보완해줄 새로운 경로를 탐색해야 한다. 이 논문에서는 최단거리 경로와 최단시간 경로의 시간과 거리를 상호보완해줄 균형경로라는 새로운 개념을 도입하여, 이를 기준으로 한국 10개 도시들에 대해 도로망의 품질 평가를 진행하였다.

1. 연구동기

자율주행 자동차 운행의 안전과 효율을 보장하기 위해 도심 도로망의 품질 평가는 필수적인 문제다. 일반적으로 운전자가 도착 점까지 도달하기 위해서 최단거리 경로(Shortest Path)를 선호하는 것이 일반적이지만, 현실에서 최단거리 경로는 그다지 중요한 정보가 아니다. 왜냐하면 최단거리 경로라고 하더라도 교차로에서 신호 대기시간 등을 고려하면 최단시간을 보장하진 못하기 때문이다.

임의의 도시 도로망을 나타내는 그림 1에서 파란색 경로는 최단 시간 경로이며, 빨간색 경로는 최단거리 경로다. 그림 1에서 왼쪽 도시 (a)의 최단시간 경로(Quickest Path)의 경우 교차로의 개수가 적은 터널을 통과하기 때문에 최단 시간을 보장할 수 있다.

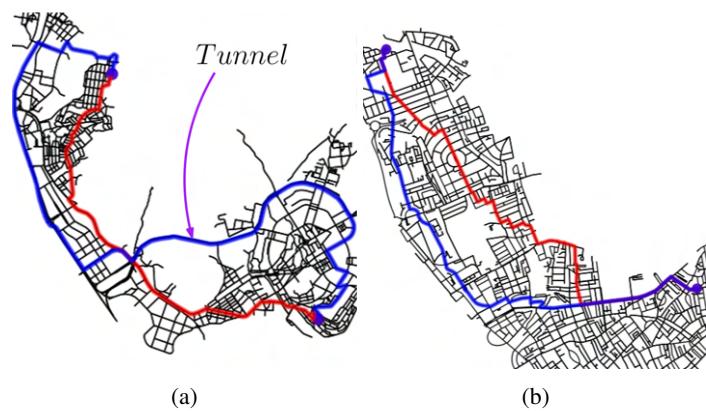


그림 1: 최단시간 경로(파랑), 최단거리 경로(빨강)

우리나라에서 제공하는 네이버 지도나 미국에서 제공하는 구글 지도의 경우, 최단거리 경로와 최단시간 경로만 제공할 뿐, 최단거리 경로 최단시간 경로 사이의 거리와 최단시간 경로 최단거리 경로 사이의 시간을 보장해주는 균형경로(Balanced Path)에 대한 정보는 전혀 제공하지 않고 있다. 균형경로의 유무에 대한 정보는 매

우 중요하다. 왜냐하면 자연재해나 도로 공사 등 여러 가지 이유로 인해 최단거리 경로, 최단시간 경로를 모두 이용할 수 없는 경우 그 대안의 경로를 탐색할 수 있어야 한다. 그러므로 우리는 앞 두 경로의 대안으로 공간상으로 최단거리, 시간상으로 가장 빠른 거리를 서로 보완하는 새로운 개념의 균형경로(Balanced Path)를 제시한다. 이로써 앞의 두 회사가 제공하지 않는 균형경로의 탐색 방법과 국내 10개 도시의 균형경로의 존재 비율에 대해 논의할 것이며, 이를 지표로 도로망의 품질을 비교하고자 한다.

2. 도로망 성능 평가 방법의 제안

지금까지 많은 연구들은 주어진 그래프에서 최단거리를 찾는 알고리즘에 대해서 진행되어왔는데, 실제 도시에서 다양한 상황 조건에 의해서 실제 운전자들은 최단거리보다는 다양한 조건으로 경로를 선택한다[1]. 막히는 최단거리보다는 덜 막히는 우회경로라던지, 운전하기에 좀 더 쉬운 넓은 도로, 전기차의 경우 충전이나 연료 보충이 좀 더 쉬운 도로, 또는 가장 적은 turn이 보장되는 경로[2, 3]를 선호한다. 이것은 운전자들은 수학적으로 가장 짧은 경로보다는 심리적으로 편안하고 선호되는 경로를 선택한다는 것이다[4]. 이렇게 운전자들의 인지과정까지 고려한 경로를 “최단순 경로(Simplest Path)”라고 말한다[5].

수학적으로 빠르기만 한 경로 탐색만으로는 도로망 성능 평가에 제약이 있다. 만약, 그림 2처럼 극단적인 경우 도로망이 Tree 형태로 되어있다고 가정하자. 그러면 최단거리 경로(빨강)와 최단시간 경로(빨강)는 고작 1개뿐이다. 이에 우리는 앞선 두 개의 경로뿐만 아니라, 직선경로(Drone Distance, 파란 점선) 그리고 새로운 균형경로라는 개념을 제시하여, 최단거리 경로, 최단시간 경로, 직선경로, 그리고 균형경로들의 비율을 비교하여 도로망의 품질을 평가하고자 한다. 따라서, 우리가 제시하는 이 평가 방법은 단순히 거리나 시간 기준의 최단 경로만을 고려하는 것이 아니라, 실제 도로 사용

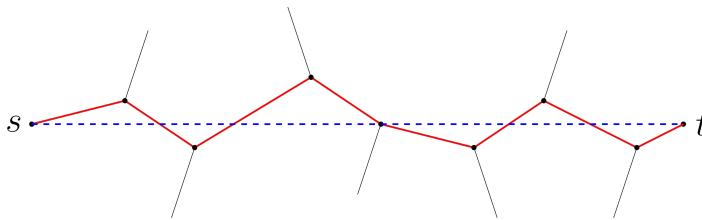


그림 2: Tree 형태의 도로망

자들의 필요와 선호를 더 잘 반영하는 방향으로 도로망의 품질을 평가하게 될 것이다.

3. 균형경로를 이용한 도로망 성능평가

3.1 균형경로의 정의

두 정점 (s, t) 에 대하여 우리는 최단거리 경로(Shortest Path), 최단시간 경로(Quickest Path)를 구할 수 있다. 균형경로란, 출발점 s 에서 도착점 t 에 대해 최단거리 경로에서 걸리는 시간과 거리 각각 T_{short}, D_{short} , 최단시간 경로에서 걸리는 시간과 거리 각각 T_{quick}, D_{quick} 가 주어질 때, T_{quick} 와 T_{short} 사이의 시간, D_{short} 와 D_{quick} 사이의 거리를 보장하는 경로를 의미한다.

3.2 최단거리 경로와 최단시간의 대응 구조

두 정점 (s, t) 에 대하여 최단거리 경로와 최단시간 경로의 대응 구조는 크게 4가지로 구분할 수 있다[6]. 아래 그림 3에서 초록색은 최단시간 경로, 주황색은 최단거리 경로를 나타내며, 파란색 점선은 두 경로에서 공통되는 부분이다. case-1은 두 경로가 특정 지점에서만 교차하며, 그 외의 지점에서는 각각 다른 방향으로 진행된다. case-2, case-3은 두 경로가 특정 구간에서만 일치한다. case-4에서 두 경로는 어느 구간에서도 일치하지 않는다.

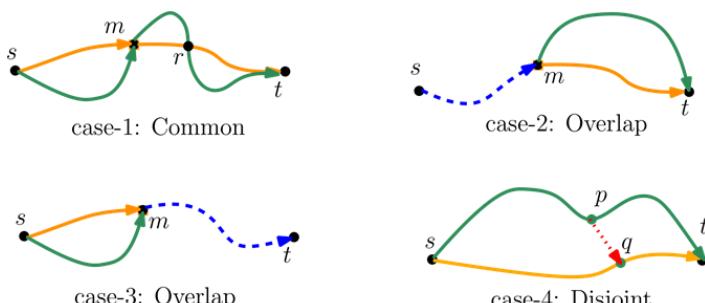


그림 3: 최단거리, 최단시간 경로의 대응구조

3.3 균형경로 탐색 알고리즘

균형경로(Balanced Path)를 구하는 방법은, 그림 1에서의 case-2, case-3의 공통되는 부분(파란색 점선)이 아닌, case-4와 같이 최단시간 경로와 최단거리 경로 위의 임의의 모든 node(교차로) 각각 (p_x, q_x) 에 대하여 최단거리 경로(Shortest Path)를 구한 후, 그 중에서 가장 거리가 짧은 최단거리 경로를 구한다. 그 다음, 경로 $[p, q]$ 에서의 거리와 걸리는 시간을 각각 구한 후, 경로 $[s, p]$ 에서의 거리

와 시간, 경로 $[q, t]$ 에서의 거리와 시간을 모두 더한다. 마지막으로, 만들어진 경로 $[s, p, q, t]$ 에서 걸리는 시간과 거리가 각각 T_{quick} 와 T_{short} 의 사이 값, D_{short} 와 D_{quick} 의 사이 값을 만족하는지 계산한다.

아래 그림 4는 임의의 도시 (a)와 (b)에 대해서 균형경로(보라색)을 표시한 것이다.

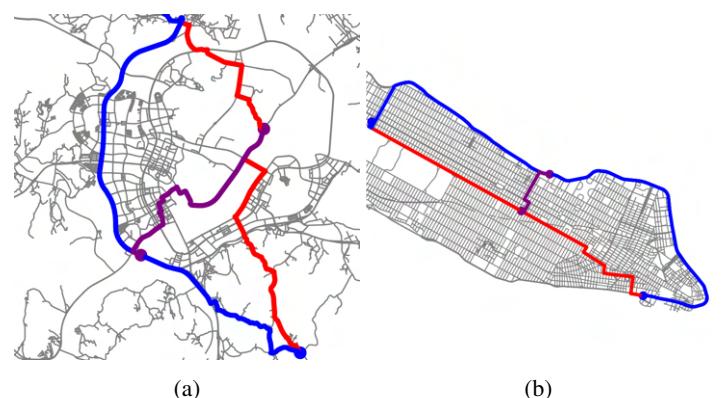


그림 4: 균형경로(보라색)

4. 10개 주요 도시 대상으로서의 실제 평가 실험

4.1 도로망 데이터 특성

도심 도로망의 품질 평가를 위해, Python 모듈 중 하나인 Osmnx를 사용하여, 10개 도시의 도로망 데이터를 얻었다. 최단시간 경로를 구할 때, 현실에서 교차로에서의 신호 대기시간을 반영하기 위해 각 node에 더해주는 시간인 $M = w + k(d - 2)$ 방정식을 세웠다. M 은 총 걸린 시간, w 는 평균대기 시간으로 20초로 설정했다. d 는 vertex(교차로)의 degree를 나타내며, degree가 2보다 작은 경우에는 $(d - 2)$ 가 0이 되도록 설정했다. k 는 교차로에서 기다리는 평균 대기 시간으로, 30초로 설정했다.

다음 표 1은 한국 주요 10개 도시의 vertex(교차로)의 수, edge(도로)의 수를 나타낸다.

City	V	E	City	V	E
서울	66574	186496	울산	10527	28823
부산	20877	59281	광주	13184	36915
인천	12361	33300	세종	8053	19433
대구	20218	57296	창원	10583	30199
대전	15177	42607	제주	21081	57866

표 1: 한국 10개 도시의 vertex, edge 개수

또한, 실험에서 국내 총 10개 도시의 각각 모든 Path의 개수 $|V^2|$ 에 대해 구하기보단, 전체 Path에서 edge의 개수가 5 이상을 만족하는 Path를 1000개, 2000개, 4000개, 8000개 무작위로 비복원추출 Sampling하여 실험하였다. 4개의 Sampling 결과, 비율의 차이가 모두 2% 내외였다.

4.2 균형경로 비율

아래의 표 2는 한국 10개 도시에서 8000개의 Path를 Sampling 했을 때, 균형경로의 비율을 나타낸다. SP는 Same Path, 즉, 최단거리 경로와 최단시간 경로가 동일하다는 뜻이다. NBP는 No Balanced Path, 균형경로가 존재하지 않는다는 뜻이며, BP는 Balanced Path의 약자다.

City	SP	NBP	BP	City	SP	NBP	BP
서울	0.61	80.01	19.38	울산	2.96	79.15	17.89
부산	1.40	81.03	17.57	광주	2.27	82.65	15.07
인천	2.93	82.09	14.99	세종	5.40	60.92	33.67
대구	1.66	81.04	17.30	창원	2.10	74.01	23.89
대전	2.48	79.81	17.71	제주	1.34	72.81	25.85

표 2: 한국 10개 도시의 BP 비율 (%)

SP의 비율이 높다는 것은 한 도시 내에서 최단거리 경로와 최단시간 경로가 크게 다르지 않다는 것을 의미한다. 이는 도로의 구조적 특성이 최단거리와 시간 모두를 최적화하는 방식으로 설계되었음을 나타낸다.

BP의 비율이 높다는 것은, 어느 한 출발 지점에서 다른 도착 지점까지 갈 수 있는 경로의 옵션 수가 많다는 것을 의미한다. 이는 운전자가 특정 상황에서 최적의 선택을 할 수 있게 해주며, 교통 혼잡이나 도로 피해 상황에서도 유연하게 대처할 수 있다는 것을 의미한다.

한국 계획도시인 세종과 창원의 도로망 품질이 우수한 것은 계획도시의 특성상 도로망 구성이 체계적으로 설계되어있기 때문이다. 특히 세종은 계획도시 중에서도 최신의 도로 설계 원칙을 반영하여 구축된 도시이다. 반면에 인천은 도시 발전 과정에서 다양한 역사적, 지리적 요인들로 인해 도로망의 체계성이 상대적으로 낮게 형성되었을 수 있으며, 이로 인해 BP 비율이 떨어진 것으로 해석될 수 있다.

4.3 도로망 품질 결정 지표

도로망의 품질을 결정하는 데는 다양한 지표가 있다. 아래의 표 3은 국내 10개의 도시에 대해 지표를 비교한 표를 보여준다. BP는 균형경로의 비율을 나타낸다. DST는 최단거리 경로 시간에 대한 직선거리 경로 시간의 비율, DQT는 최단시간 경로 시간에 대한 직선거리 경로 시간의 비율, DSD는 최단거리 경로 거리에 대한 직선거리 경로 거리의 비율, DQD는 최단시간 경로 거리에 대한 직선거리 경로 시간의 비율을 뜻한다.

세종의 경우 한국에서 계획도시다. 균형경로의 비율이 10개 도시 중에서 가장 좋은 결과를 보였지만, 시간과 거리 측면에서는 좋지 못한 결과를 보였다.

City	BP	DST	DQT	DSD	DQD
서울	19.38	11.9	1.88	1.13	1.51
부산	17.57	8.61	1.20	1.18	1.42
인천	14.99	3.99	1.23	1.29	1.96
대구	17.30	6.16	1.08	1.16	1.58
대전	17.71	7.70	1.72	1.20	1.93
울산	17.89	4.07	1.83	1.27	1.71
광주	15.07	7.11	1.55	1.18	1.75
세종	33.67	7.39	4.43	1.34	1.50
창원	23.89	5.14	2.04	1.33	1.60
제주	25.85	6.12	2.56	1.16	1.38

표 3: 국내 10개 도시의 지표 비교

5. 결론

- 국내 도시 10개에 대하여 세종이 균형경로의 존재 비율이 가장 높았다.
- 균형경로를 구하는 $O(|P^2|)$ 의 알고리즘을 제시하였다. P 는 경로의 길이를 나타내며, 평균적인 길이는 10이다.
- 도시의 규모가 커질수록 도로망의 품질이 낮다.
- 세종의 경우 계획도시임에도 불구하고 Drone Distance에서 걸리는 시간과 최단거리 경로에서 걸리는 시간의 비율, 최단시간 경로에서 걸리는 시간의 비율이 각각 10위, 9위를 차지했다.

참고 문헌

- [1] R. G. Golledge, “Path selection and route preference in human navigation: A progress report,” pp. 207–222, Springer, 1995.
- [2] Y. Zhou, W. Wang, D. He, and Z. Wang, “A fewest-turn-and-shortest path algorithm based on breadth-first search,” pp. 201–207, 2014.
- [3] B. Jiang and X. Liu, “Computing the fewest-turn map directions based on the connectivity of natural roads,” pp. 1069–1082, 2011.
- [4] M. Denis, F. Pazzaglia, C. Cornoldi, and L. Bertolo, “Spatial discourse and navigation: An analysis of route directions in the city of venice,” pp. 145–174, 1999.
- [5] M. Duckham and L. Kulik, “‘simplest’ paths: automated route selection for navigation,” pp. 169–185, Springer, 2003.
- [6] H.-G. C. Bee Geum, “Time-distance balanced path finding algorithms in urban road networks,” *한국정보과학회 학술발표논문집*, pp. 244–246, 2023.