

교통약자의 보행 안전을 위한 경사도 기반 보행 취약지역 분석 및 최적 경로 탐색에 관한 연구

임윤정^{1,2}, 송규원^{1,*}, 박호진^{2,*}

¹차세대융합기술연구원, ²성균관대학교

{yunjeong.im, gyuwon.song}@snu.ac.kr, hogunpark@skku.edu

A Study on the Terrain-aware Path Planning Using Digital Elevation Models to Enhance Safety and Accessibility

Yunjeong Im^{1,2}, Gyuwon Song^{1,*}, Hogun Park^{2,*}

¹Advanced Institute of Convergence Technology, Suwon, Republic of Korea,

²Sungkyunkwan University, Suwon, Republic of Korea

요약

본 논문은 수치표고모델(Digital Elevation Model, 이하 DEM)을 통해 산출한 경사도와 클러스터링 기법을 활용하여 가파른 경사가 빈번한 지점을 보행 취약지역으로 도출하고, 경사도와 거리 가중치를 고려한 A* 알고리즘 기반 안전한 경로 탐색 방법을 제안한다. 이를 위하여 실제 인천시 보행 네트워크 데이터를 사용하여 도로 구간별 경사도를 산출하고, 경사도 5%를 초과하는 취약 구간을 식별한다. 취약 구간을 DBSCAN 기법을 적용함으로써, 연속적인 경사 구간을 취약 클러스터로 도출하였다. 분석 결과, 인천시 424,271개의 보행로 중 약 15%를 차지하는 63,641개가 경사도 5%를 초과하는 것으로 나타났다. 또한, 경사도 가중치를 고려한 A* 알고리즘은 급경사 구간을 식별하고 회피할 수 있어 교통약자가 접근 가능한 경로를 생성한다. 실험 결과, 제안한 방법은 최단 거리 기반 A* 대비 거리를 크게 늘리지 않고도 가파른 경사에 패널티를 주어 물리적인 장벽을 크게 줄여주는 것으로 나타났다. 본 연구를 토대로 교통약자의 이동에 있어 안전하고 편리한 경로를 제공할 수 있으며, 도시 보행 안전 정책 수립의 기초자료로 활용될 수 있음을 시사한다.

I. 서론

최근 도시 환경에서의 보행 이동성은 단순한 편의성을 넘어 교통약자의 사회적 포용성과 직결되는 중요한 주제로 부상하고 있다. 기존 내비게이션 서비스가 제공하는 최단 경로에는 종종 급경사나 계단과 같은 물리적 장애물이 포함되어 있어 유용성과 실용성이 제한된다. 또한 경로 탐색에 관한 연구는 주로 A* 알고리즘을 사용하여 경로의 유효성을 보장하지만, 대부분 2D grid 환경을 전제로 설계되어 실제 지형이나 경사도와 같은 요인을 충분히 반영하지 못한다. 따라서 도시 보행 네트워크 내에서 교통약자 친화적이고 현실적인 무장애 경로를 산출하기 위해서는 지형 특성을 고려한 경로 탐색 기법이 요구된다.

본 연구는 DEM 기반 지형의 고도 정보를 반영한 보행 네트워크를 구축하고, 경사도가 5%를 초과하는 지점이 밀집된 지역을 교통약자 보행 취약지역으로 정의하기로 한다. 가파른 경사 구간이 밀집된 지역을 도출하기 위해 DBSCAN(Density-based spatial clustering of applications with noise) 기법을 활용하였다. 또한, 경사도 가중치를 반영한 A* 경로 탐색 알고리즘을 개발하였다. 개발된 알고리즘은 경사 수준에 따른 패널티를 비용 함수에 반영하여 가파른 경사를 회피하고, 보다 원활한 이동 경로를 도출하는 것을 목표로 한다.

II. 본론

본 연구에서 활용한 데이터셋은 인천광역시에서 제공한 보행자 네트워크 데이터와 1m급 DEM을 결합하여 구축하였다. 보행자 네트워크 데이터

는 노드와 링크로 구성되며, 각 노드는 고유 식별자와 위·경도 좌표를 포함한다. 각 링크는 길이, 보행 시설 위치(예: 계단, 보도턱, 엘리베이터 등)를 속성으로 가진다. DEM은 xdem 라이브러리를 이용해 경사도 래스터로 변환하였으며, 이를 통해 각 링크의 평균 경사도를 계산하여 네트워크에 할당하였다. 인천시 전체 네트워크에서 무작위로 1,000개의 출발지와 도착지 쌍을 추출하여 경로 탐색 시나리오를 구성하였다.

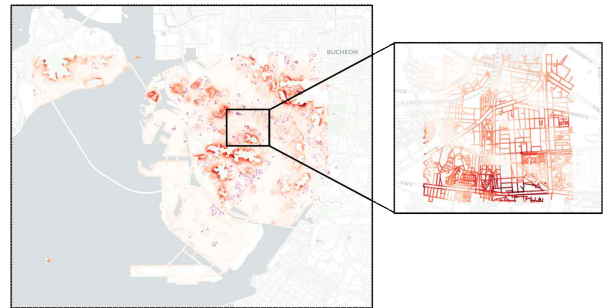


Figure 1. Illustration of the pedestrian network data incorporating DEM-derived slope information.

기존 A* 알고리즘은 유클리드 거리 기반 비용을 최소화하여 경로를 탐색하는 방식이다. A*는 OPEN 리스트에서 가장 작은 $f(s)$ 값을 갖는 노드를 선택하여 확장해 나가며, 목표 노드에 도달할 때 최적 경로를 반환한다. 본 연구에서는 이를 확장하여 경사 정보를 반영한 A* 알고리즘을 개발하였다.

$$f(s) = g(s) + h(s) \quad (1)$$

$$g(s_j) = g(s_i) + d_{2D}(s_i, s_j) + \lambda \cdot |\Delta z| \quad (2)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{|\Delta z|}{d_{2D}(s_i, s_j)}\right) \quad (3)$$

여기서 $d_{2D}(s_i, s_j)$ 는 수평 거리, Δz 는 고도 차, λ 는 경사 페널티 계수를 의미한다. 또한, 경사각 θ 가 미리 정의된 임계값(본 연구에서는 5%)를 초과할 경우, 해당 간선(edge)은 비가용 링크로 간주되어 탐색에서 배제된다.

III. 실험 결과

본 연구에서는 예측된 경로가 접근성 제약을 얼마나 잘 준수하는지를 평가하기 위해 접근성 점수(Accessibility Score)를 사용하였다. 접근성 점수는 Jaccard 유사도 기반 지표로 정의된다. 여기서 P 는 알고리즘이 탐색한 경로, P_{GT} 는 5%를 넘어가는 경사 구간을 제외한 접근 가능한 기준 경로를 의미한다. 점수가 높을수록 실제 환경의 지형 제약을 충실히 반영한 경로를 산출했음을 의미한다.

$$\text{Accessibility Score}(P, P_{GT}) = \frac{|P \cap P_{GT}|}{|P \cup P_{GT}|} \quad (4)$$

표 1은 제안한 알고리즘과 Standard A의 성능을 비교한 결과를 보여준다. 제안한 알고리즘은 총 1,000개의 탐색 시나리오에 대해 접근성 점수(Accessibility Score) 1.00을 달성하였다. 이는 모든 경로에서 5% 이상의 경사 구간을 완전히 회피했음을 의미한다. 반면 최단 거리 기반 Standard A*는 0.75 수준에 그쳐, 전체 경로의 약 25%가 여전히 비가용 구간을 포함하였다. 또한 평균 경사도는 제안 기법이 4.31%로, Standard A*의 5.45%보다 완만한 경로를 제공하였다. 이동 거리의 경우 제안 방법이 평균 551.4 m로 Standard A*의 539.4 m 대비 약 2.2% 증가에 불과하여, 접근성을 확보하면서도 효율적인 경로 탐색이 가능함을 입증하였다. 실험 결과, 경사도 기반 비용 함수와 접근성 평가 지표를 통해 도시 환경에서 실질적인 무장애 보행 경로 탐색이 가능함을 보여준다.

Table 1. Comparison of standard A* and slope-aware A* on accessibility, terrain slope, and path length.

Method	Acc. Score	Avg. Slope	Distance(m)
Standard A*	0.75	5.45	539.4
Ours	1.00	4.31	551.4

그림 2는 인천시 보행 네트워크에서 Standard A*와 제안한 알고리즘이 생성한 경로를 시각적으로 비교한 결과이다. 검은색 선은 Standard A*가 탐색한 경로를 나타내며, 파란색 선은 제안 방법이 탐색한 경로를 나타낸다. Standard A* 경로는 단순히 최단 거리를 우선시하기 때문에 경사가 5%를 초과하는 구간을 포함하고 있으며, 이는 휠체어 사용자와 같은 이동 제약이 있는 보행자에게 부적합하다. 반면 제안한 알고리즘의 경로는 다소 긴 거리임에도 불구하고 경사도가 낮고 계단을 회피하여, 실제 환경에서 무장애 경로 탐색이 가능함을 확인할 수 있다.

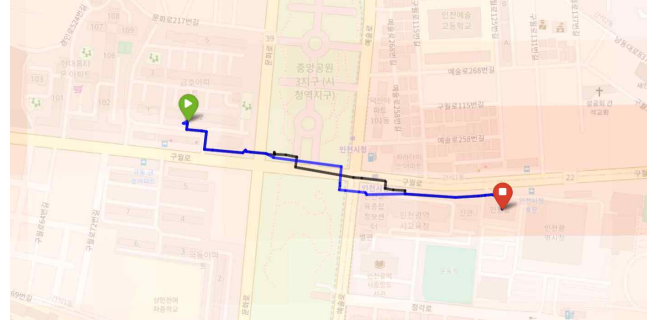


Figure 2. Comparison of paths generated by Standard A* (black) and slope-aware A* (blue).

IV. 결론

본 연구는 DEM 기반의 경사도를 인식한 A* 경로 탐색 알고리즘을 제안하고, 이를 실제 도시 보행자 네트워크에 적용하여 그 성능을 검증하였다. 제안 알고리즘은 Standard A*에 비해 접근성을 크게 향상시키면서도 이동 거리의 증가를 거의 유지하였으며, 결과적으로 이동 약자를 위한 현실적이고 포용적인 도시 보행 경로 탐색 가능성을 입증하였다.

향후 연구에서는 스트리트 뷰 및 항공 영상 등의 시각적 데이터를 활용하여 다양한 물리적 장애물을 반영하고, 비전-언어 모델을 활용한 장애물 인식 기능을 추가함으로써 보다 정교하고 실용적인 무장애 경로 탐색 체계를 구축할 예정이다. 이는 궁극적으로 도시 내 보행 약자의 이동권 보장과 자율주행 로봇의 안정적 운용을 동시에 실현하는 데 기여할 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(No.RS-2024-00397607)과 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2024-00351159)

참고 문헌

- [1] Davies R. W. "The Data Encryption standard in perspective," Computer Security and the Data Encryption Standard, pp. 129-132.
- [2] Miles E. Smid, "From DES to AES," 2000, (<http://www.nist.gov/aes>).
- [3] Shamir, A. "On the security of DES," Advances in Cryptology, Proc.Crypto '85, pp. 280-285, Aug. 1985.
- [4] NIST, "Announcing the Advanced Encryption Standard(AES)," FIPS PUB ZZZ, 2001, (<http://www.nist.gov/aes>).
- [5] Daemen, J., and Rijmen, V. "AES Proposal: Rijndael, Version2.," Submission to NIST, March 1999.