서울시 심야 교통난 완화를 위한 승차공유택시 효율성 분석
Efficiency Analysis of Ride-Sharing Taxis for Alleviating Late-Night Traffic Congestion in Seoul

이주헌[1] · 신동건[2] · 임지인[3] · 전철민[4]
Juheon Lee[1] · Donggeon Shin[2] · Jiin Lim[3] · Chulmin Jun[4]

[1]서울시립대학교 공간정보공학과 학사과정(dlwngjs99@uos.ac.kr)
2서울시립대학교 공간정보공학과 학사과정(tonyshin1216@uos.ac.kr)
3서울시립대학교 공간정보공학과 학사과정(wldls9854@uos.ac.kr)
4서울시립대학교 공간정보공학과 교수 교신저자(cmjun@uos.ac.kr)

요 약

서울시 심야 시간대 택시 공급 부족은 시민 이동성에 큰 제약을 초래하고 있다. 본 연구는 심야 교통난 완화를 위해 (Luo et al, 2022)이 제안한 계층적 군집화 알고리즘(HGR)을 참고하여, 서울시 심야 승차공유 서비스의 효율성을 분석하였다. 연구 방법으로는 심야 승객의 가상 경로를 생성하고 이진 병합 기반 계층적 군집화를 수행한다. 이후 군집 별 MST 기반 최적 경로를 생성하고, 8분 이내 접근 가능한 택시 매칭 시뮬레이션을 수행한다. 본 연구는 우회 허용치 계수를 도입하여 병합 여부를 판단하였으며 이는 승차지점은 밀집되나 도착지점은 분산된 서울시 심야 택시 통행 특성을 고려하여, 도착지점 간 과도한 거리 증가를 방지하기 위함이다. 분석 결과, 승객 그룹화를 통해 한 대의 택시가 복수의 승객 수요를 처리할 수 있는 가능성이 확인되었으며, 이에 따른 요금 절감 효과도 확인할 수 있었다.

1. 서론

심야 시간은 대중교통의 운행이 종료되어 택시 서비스에 대한 수요가 급증한다. 서울시는 수년간 심야 택시의 수요-공급 불균형 현상을 보이고 있으며, 심야 시간대 택시 공급 부족은 시민 이동성에 큰 제약을 초래하고 있다. 실제 심야 시간대는 평균 15~28% 수준의 낮은 배차성공률을 기록하였으며, 중·단거리 이동은 장거리에 비해 더 낮은 배차 성공률을 보인다. 또한 장거리 이동 시에는 공차율이 높아져 시내 택시 공급량이 감소하는 문제도 발생한다.(국토교통부, 2022)

이를 해결하기 위해 서울시는 개인 택시 수를 늘리는 정책을 펼쳤으나, 법인 택시 수가 줄어들고 개인 택시는 심야 운전을 거부하는 등 심야 교통은 개선되지 않았으며, 택시 수 증가로는 해결이 되지 않음을 보였다.

최근 스마트폰과 GPS 기술의 보급화로 플랫폼 택시 서비스가 활성화된 가운데, Uber 등 국제 기업들은 도시 내 교통 효율성 및 이용자 편의 증진을 목표로 공유차량 서비스를 제공하고 있다. 공유차량 서비스는 플랫폼의 네트워크 효과에 따라 참여자가 증가할수록 각 참여자가 부담하는 비용은 감소하고, 효용은 증가하게 된다. 그러나 효율적인 승차공유 서비스를 위해서는

승객의 수요 패턴 및 경로 특성을 분석하여 군집화 및 최적 경로를 생성하는 것이 필수적이며, 이에 대해 DaRP와 MDVRP 등의 분야에서 많은 연구가 진행되고 있다.

특히 선행 연구(Luo et al, 2022)에서는 다수 차량 기반 Dial-a-Ride Problem (Multi-vehicle DaRP)을 해결하기 위해, 계층적 군집화와 경로 최적화를 결합한 HGR 알고리즘을 제안하였다. 그중 군집화 단계인 HGA는 이진 병합 기반의 계층적 군집화 방법으로 실제 도시형 데이터를 활용한 시뮬레이션에서 기존 휴리스틱 방법 대비 총 이동거리 30% 감소, 이동 중 지연시간 최대 50% 단축의 성과를 보이며 알고리즘의 효율성을 검증한 바 있다. 그러나, 기존 연구는 출발지와 도착지가 비교적 고르게 분포된 이상적인 도시 조건을 기반으로 하였으며, 출발지 간 거리 제한이나 종점 간 병합 제약 등 현실적인 공간 조건은 고려되지 않았다.

본 연구는 심야 교통난 완화를 위해 (Luo et al, 2022)이 제안한 계층적 군집화 알고리즘(HGA)을 서울시 심야 교통환경에 적용하여 승차 공유 시뮬레이션을 수행한다. 기존 연구와 달리 시점 간 거리 제한을 두어 승객의 탑승 대기시간을 고려하고, 우회허용치계수를 도입하여 시점은 밀집되나 종점은 분산되어 있는 서울시 심야 택시의 통행 특성에 맞게 승차 공유 시 종점 간 과도한 이동 증가를 방지한다. 우회허용치계수를 변동적으로 적용하며 시뮬레이션을 수행함으로써 그에 따른 배차성공 향상률, 운행당 평균 승객 수, 개인별 요금 감소율 등을 평가하여 서울시 승차 공유 택시 도입의 효율성을 분석하고자 한다.

2. 본론

본 연구는 시뮬레이션 환경 설정, 승객 및 택시 경로 생성, 승객 군집화, 군집별 경로 생성, 그리고 택시 배차의 총 5단계로 구성된다. 택시의 출발지는 서울특별시이며 도착지는 서울과 그 인근 지역인 인천과 경기도를 포함하였다. 데이터는 '택시 기종점 통행량 데이터'와 '서울시 주요도로 택시 운행분석 데이터'를 이용하였으며 각각 부동산 빅데이터 플랫폼과 서울특별시 빅데이터 캠퍼스에서 취득하였다. 택시 기종점 통행량 데이터는 500m * 500m의 공간해상도를 가지는 격자 데이터이며 서울시 주요도로 택시 운행분석 데이터는 서울시 주요도로 링크 150m 단위로 나뉘어진 형태이다.

시뮬레이션의 환경 설정은 다음과 같다. 시간 범위는 택시 승객의 평균 대기 시간인 8분으로 설정하였으며(서울 연구원, 2022) 서울시 심야시간 8분당 산출된 평균 승차건수는 3200건으로(서울특별시, 2024), 승객 수를 3200명으로 설정하였다. 택시 수는 심야시간 배차 성공률이 15~28%(국토교통부, 2022)인 점을 고려하여 승객 수의 28%인 900대로 설정하였다.

다음으로 승객 개인 경로 및 택시를 생성한다. 택시 기종점 통행량 데이터를 이용하여 각 기종점 쌍에 통행량 비례 확률을 부여하고, 확률적으로 기종점 쌍을 추출한다. 이후 승객의 경로는 기점 격자 내 임의의 점과 종점 격자 내 임의의 점을 OSRM(Open Source Routing Machine)을 이용하여 Linestring 형태의 벡터데이터로 생성하였다. 각 승객의 경로는 $r_i = (s_i, t_i)$로 나타난다.

택시 생성은 서울시 주요 도로 택시 운행분석 데이터의 링크 별 공차량을 이용하였다. 링크별 공차량을 기반으로 확률적으로 900대의 택시를 도로 위에 임의 생성하였다.

승객 간 군집화는 선행 연구에서 제시된 HGA 알고리즘을 기반으로 수행한다. HGA

는 Cluster(outer layer)와 Group(inner layer)의 개념을 이용하고, $\log_2\lambda$(λ = 택시 수용 가능 인원)회 반복을 하며 Clustering과 Grouping을 진행한다. 본 연구는 택시 수용 가능 인원을 4로 설정하여 2회의 병합을 반복한다.

Clustering은 서로 다른 Cluster 간의 Clustering Cost를 계산하여 병합 가능성이 높은 클러스터 쌍을 탐색하는 단계이다. 초기에는 각 승객이 하나의 Group으로 구성된 Cluster로 시작한다. Cluster는 χ ,χ ′로, Group은 $\{X,X' : X\in\chi$,$X'\in\chi$ ′$\}$로 나타낸다. Clustering Cost는 다음과 같이 정의되며, Clustering Cost가 낮은 순서대로 Cluster 쌍으로 묶이게 된다.

(1)Minimum Spanning Tree

$MST_{s,t}(X) = MST_s(X) + MST_t(X)$

$MST_s(X) =$
$MinimumSpanningTree\{s_r : r\in X\}$
$MST_t(X) =$
$MinimumSpanningTree\{t_r : r\in X\}$

Minimum Spanning Tree는 특정 그래프의 정점을 연결하는 트리 중, 가장 최소의 weight을 가지는 신장 트리이다. $MST_s(X)$는 출발지점 간의 최단거리 연결, $MST_t(X)$는 도착지점 간의 최단거리 연결을 의미한다.

(2)함께 이동 시 추가 비용

$w_1(X,X') =$
$MST_{s,t}(X\cup X') - MST_{s,t}(X) - MST_{s,t}(X')$

(3)따로 이동 시 비용

$w_2(X,X') =$
$\min_{r\in X} d(s_r,t_r) + \min_{r'\in X'} d(s_{r'},t_{r'})$

Clustering Cost는 1km 내에 위치한 Cluster간 w_1과 w_2의 비교를 통해 구하게 된다. w_1은 함께 이동시 추가 비용으로 group X와 X'을 연결할 때 출발지점과 도착지점을 추가로 연결하는 비용이다. w_2는 따로 이동 시 비용으로 각 그룹의 최단거리 이동경로의 합으로 나타내며, 이는 두 그룹이 병합하면서 넘지 말아야 할 상한선의 개념이 된다.

(4)Clustering Cost

$w(\chi$,χ ′$) =$
$\min_{X\in\chi, X'\in\chi'} \min(w_1(X,X'), w_2(X,X'))$

Cluster쌍 사이에서 발생할 수 있는 모든 비용(w_1과 w_2)의 최소값을 찾아서 Cluster Cost를 산출하고 값이 낮은 순서대로 Cluster쌍을 묶어준다.

Grouping 단계에서는 Clustering Cost를 통해 묶인 Cluster쌍에 대해 두 Cluster 내의 Group이 병합 가능한지 판단한다. 모든 Group쌍에 대하여 병합 시 추가 비용과 따로 이동 시 비용을 비교하며 선행연구와 달리 우회 허용치 계수를 적용하여 Grouping 범위를 조절하였다.

(5) 우회 허용치 계수

$k : k\in[0.25, 0.5, 0.75, 1]$

선행연구의 경우 k값이 1인 경우와 같으며 k값에 따른 서울시에서의 승차 공유 택시 효율성을 평가한다.

(6) Group 병합 판단

$\forall X\in\chi$,$\forall X'\in\chi$ ′:
$w_1(X,X') \le k\times w_2(X,X') \rightarrow merge\ X \text{ and } X'$
$w_1(X,X') > k\times w_2(X,X') \rightarrow keep\ separate$

Clustering과 Grouping을 2회 반복한 후 각 Group은 1~4인으로 구성된다.

생성된 군집들에 대하여 최적 경로를 생성한다. 최적 경로는 모든 승객을 태운 후 모든 승객을 내려주는 방식으로 Divide and conquer 방식에서 착안하였다. Divide and conquer 방식은 복잡한 문제를 더 작은 부분 문제로 나누고, 각 부분 문제를 해결한 후 그 해결책을 결합하여 전체 문제를 해결하는 접근법으로, 전체 승객을 출발지 묶음, 도착지 묶음, 두 묶음을 잇는 경로로 나누어 최적경로 생성에 접근하였다. 즉, 최종 그룹 X에 대하여 승차지점 최소 신장 트리와 하차지점 최소 신장 트리(1st MST)를 계산하여 각 묶음의 최적 경로를 구하고 두 묶음의 양 끝을

연결하는 최소 신장 트리(2nd MST)를 구함으로써 모든 승객을 픽업하고 드랍하는 경로를 생성한다. 모든 군집에 대하여 최종경로가 생성되고, 각 군집의 첫 번째 승객 탑승 위치가 택시의 호출 위치가 된다.

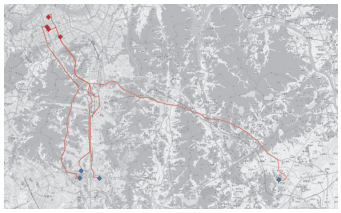

그림1. k=1일 때의 군집화 샘플

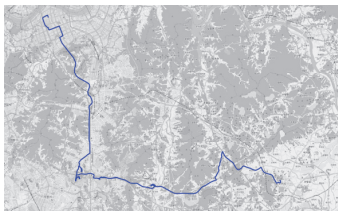

그림2. 그림1의 최적경로

택시는 8분 내에 접근 가능한 호출을 탐색한다. 접근 가능한 호출이 여러 개일 경우, 가장 가까운 호출에 매칭되며, 접근 가능한 호출이 없다면 배차에 실패한 것으로 간주한다. 결과는 다음과 같다.

	k=0.25	k=0.5	k=0.75	k=1
평균 요금 감소율	27%	40%	43%	43%
운행당 평균 승객	1.5명	2.1명	2.6명	3.2명
평균 우회 거리 비율	8%	25%	44%	68%
배차 성공률	41%	55%	66%	72%

우회 허용치 계수가 증가함에 따라 평균 승객 수, 배차 성공률이 상승하는 경향을 보였다. 그러나 k=0.5를 초과하면 평균 요금 절감 효과는 둔화되는 반면, 평균 우회 거리가 급격하게 증가하는 모습을 보여주었다.

3. 결론

본 연구는 서울시 심야 시간대의 택시 초과 수요 문제를 완화하기 위한 방안으로, 승차 공유 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 위해 이진 병합 기반의 계층적 군집화 알고리즘(HGA)을 도입하고, 서울시의 통행 특성을 반영하여 우회허용치계수 및 출발지 간 거리 제약을 적용함으로써 실제 동승 가능성이 높은 승객 간의 효율적인 그룹화를 시도하였다.

시뮬레이션 결과, 공유 탑승을 통해 차량 1대당 평균 승객 수가 증가하였고, 요금 부담은 분담 구조를 통해 일정 부분 완화되는 경향을 보였다. 또한, 종점 분산에 따른 승차 거부나 과도한 우회를 방지하기 위한 제한 조건(k값)은 0.5를 기준으로 서비스 품질 유지를 위한 기준으로 기능할 수 있음을 확인하였다.

이러한 결과는 군집 기반 승차 공유가 심야 시간대 교통 서비스의 효율성 제고에 기여할 수 있음을 보여주며, 향후에는 실제 운영 데이터와의 연계 및 수요 예측 기반의 실시간 배차 시스템과의 통합을 통해, 더욱 정교하고 실용적인 교통 서비스 모델로 확장해 나갈 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Luo, K., Florio, A. M., Das, S., & Guo, X. (2022). A Hierarchical Grouping Algorithm for the Multi-Vehicle Dial-a-Ride Problem. arXiv preprint arXiv:2210.05000

2. 국토교통부, 2022, 심야 택시난 완화 대책

3. 서울 연구원, 2022, 2022년 택시 서비스 시민 만족도 조사

4. 서울특별시, 2024, 주요 교통 통계 > 택시 현황 https://news.seoul.go.kr/traffic/archives/307