

도로 인프라 모니터링을 위한 자율주행 차량 최적경로 알고리즘

An Optimal Route Algorithm for Automated Vehicle in Monitoring Road Infrastructure

김 규 옥* · 조 선 아**

* 주저자 : 한국교통연구원 미래차연구센터 선임연구위원

** 공저자 : 한국교통연구원 모빌리티전환연구본부 주임연구위원

Kyuok Kim* · SunA Cho**

* Center for Future Vehicles, Korea Transport Institute

** Dept. of Mobility Transformation, Korea Transport Institute

† Corresponding author : Kyuok Kim, kko@koti.re.kr

Vol. 22 No.1(2023)
February, 2023
pp.265~275

pISSN 1738-0774
eISSN 2384-1729
<https://doi.org/10.12815/kits.2023.22.1.265>

Received 16 November 2022
Revised 21 November 2022
Accepted 19 December 2022

© 2023. The Korea Institute of
Intelligent Transport Systems. All
rights reserved.

요 약

본 논문의 목적은 도로 인프라의 안전성 관리를 위해 운행하는 자율주행차의 최적경로 선정 알고리즘을 제안하는 것이다. 자율주행차는 지정된 구역의 도로 네트워크의 노드-링크를 최소한 한 번 이상 주행하며 인프라 요소의 위험성을 검지하고, 다시 차고지로 복귀해야 한다. 이때 위험도가 높은 노드-링크를 우선 방문해야 한다. 본 논문에서는 위험도가 높은 노드-링크를 방문하면 높은 보상을 주는 보상 최적화 알고리즘을 제안하였다. 새로운 알고리즘의 유효성 검증을 위해 토이 네트워크를 구성하고, 중국 집배원 배달경로 알고리즘과 비교했다. 보상 최적화 알고리즘의 이동 횟수는 중국 집배원 배달경로의 이동 횟수와 같으나, 임의로 지정된 고위험 노드-링크는 보상 최적화 알고리즘에서 선 순위로 통과했다. 하지만, 본 연구의 보상 최적화 알고리즘은 단순구조의 토이 네트워크를 통해 검증하였으나, 향후 실제 도로환경과 유사한 복잡한 네트워크에서 알고리즘의 유효성을 검증해야 하는 과제가 남아 있다.

핵심어 : 자율주행시스템, 도로 인프라 모니터링, 최적경로 알고리즘, 도로위험도

ABSTRACT

The purpose of this paper is to devise an optimal route allocation algorithm for automated vehicle(AV) in monitoring quality of road infrastructure to support the road safety. The tasks of an AV in this paper include visiting node-links at least once during its operation and checking status of road infrastructure, and coming back to its depot.. In selecting optimal route, its priority goal is visiting the node-links with higher risks while reducing costs caused by operation. To deal with the problem, authors devised reward maximizing algorithm for AVs. To check its validity, the authors developed simple toy network that mimic node-link networks and assigned costs and rewards for each node-link. With the toy network, the reward maximizing algorithm worked well as it visited the node-link with higher risks earlier than chinese postman route algorithm (Eiselt, Gendreau, Laporte, 1995). For further research, the reward maximizing algorithm should be tested its validity in a more complex network that mimic the real-life.

Key words : Automated Driving System, Road Infrastructure Monitoring, Optimal Route Algorithm, Road Hazard

I. 서론

자동차의 도로 운행 안전을 확보하기 위해 도로 인프라를 관리할 필요가 있다. 일반인이 운전하는 자동차뿐만 아니라 자율주행차의 운행 안전 확보를 위한 도로 인프라의 관리는 중요하다. 특히, Lv.4 이상 자율주행차는 도로 인프라 요소와 통신을 통해 연결하고, 센서를 통해 도로 환경을 인지하고 있다. 이는 일반 운전자 운행하는 자동차와 다르게 차량에 부착된 센서 성능, 인프라와 연계된 통신 계통의 성능, 판단 알고리즘의 한계로 인한 추가 위험이 발생할 수 있다. 이에 따라 도로 인프라 환경 중 Lv.4 자율주행차의 안전 운행에 저해가 될 수 있는 도로 인프라 요소를 모니터링하고 관리할 필요가 있다.

도로 인프라 요소는 일반인 운전자와 자율주행차 운행에 모두 영향을 미치는 요소와 자율주행차에만 영향을 미치는 요소가 있다. 노면 포장 상태, 물고임, 차선 표시 등 물리적 도로 인프라는 일반인 운전자와 자율주행차 모두에 영향을 미치고, 정밀도로 지도 변화, 교통 사고정보, 디지털 표지 정보 등 디지털 인프라와 연결성을 위한 통신 인프라는 자율주행차의 센서와 통신을 통한 인지 기능, 나아가 운행 알고리즘의 판단에 미치는 영향이 더 클 수 있다 (Kim et al. 2022).

자율주행차의 운행 안전에 영향을 미치는 인프라 요소는 그 특성에 따라 위험 요소의 발견 시점부터 복구가 필요한 시점까지의 기간이 상이하다. 인프라 위험 요인이 발견되면, 복구가 필요한 수준인가를 판단하고, 필요한 경우 복구할 수 있도록 주기적인 관찰이 필요하다. 이러한 도로 인프라 위험 요인 모니터링을 자율주행차를 활용해 더 효율적으로 차량을 운영할 수 있도록 최적 경로를 선정할 필요가 있다.

본 논문은 자율주행차를 활용해 도로 인프라 모니터링을 수행하는 데 필요한 자율주행차 최적 경로 알고리즘을 제안하는 것을 목적으로 한다. 자율주행차는 주어진 도로 네트워크를 빠짐없이 주행하되, 위험도가 높은 노선을 우선 관찰할 필요가 있으며, 주행을 마치고 출발지(차고지)로 복귀해야 한다. 이러한 자율주행 모니터링 차량의 경로선택 문제는 방문 판매원 및 중국 집배원 배달경로 문제와 같다. 본 연구에서는 이러한 경로선택 문제를 해결하기 위해 위험도가 높은 도로를 우선 모니터링하는 것에 대한 보상을 최적화하고, 운행 시간을 단축할 수 있는 최적화 모델로 보상 최적화 모델을 제안하였다.

본 논문의 구성은, 자율주행 위험 모니터링을 위한 도로환경과 도로 네트워크의 환경 설정을 정의하고, 최적 경로를 도출할 수 있는 자율주행 모니터링 차량 최적 경로 탐색 모델을 제안하였다. 다음으로, 제안된 모델을 통해 최적해가 도출됨을 증명하고, 결론과 향후 연구 과제를 논의하였다.

II. 선행연구 분석

1. 선행연구 분석

자율주행 모니터링 차량은 주어진 도로교통 네트워크를 1회 순회하고, 출발지로 다시 복귀해야 하며, 주어진 조건에서 최적의 경로를 선택해야 한다. 이와 같은 최적 경로 탐색 모델로 잘 알려진 방문 판매원 문제 (TSP: Traveling Salesman Problem) 모델이 있다. 방문 판매원은 주어진 여러 도시를 최단 거리로 방문하고 다시 출발 지점으로 돌아 오는 것을 경로선택의 목적으로 하고 있다. 그러나, 이 문제를 해결할 수 있는 경로를 도출하는 것은 매우 어렵다. 따라서 다양한 논문에서는 TSP의 가정을 일부 완화하여 효율적인 경로를 제시하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 대표적인 연구로, 진행 경로의 방향성 존재 여부에 따라 대칭 혹은 비대칭 모델과 경로의 중복 통행이 가능한 중국 집배원 경로 탐색 모델이 있다.

Hernandez et al.(2022)는 최소비용 신장 가지 문제(minimum cost spanning tree problem)의 해를 구하는 방안으로 비협력적 내쉬 프로그램(Nash Program)을 활용하여 도출하였다. 하나의 재화 혹은 서비스를 얻기 위해 기존에 구축된 네트워크를 이용하거나 새로운 네트워크를 가설해야 하는 경우 이를 위한 비용을 재화 혹은 서비스를 얻고자 하는 다수의 다른 참여자(player)가 분담하는 메커니즘을 이용하여, 부분게임완전내쉬 균형(sub-game perfect Nash equilibrium)이 도출됨을 증명한 것이다. 이때 참여자는 효용 극대화를 추구하기 때문에 가장 효율적인 네트워크를 선호하며, 모든 참여자의 정보는 대칭적이다. 또한, 참여자는 위험을 회피하거나, 최소한 위험에 대해 중립적인 입장이다. 참여자 모두가 게임이 빠르게 종료되는 것을 원하는 것으로 가정하였을 때, 참여자는 게임 참여 순서에 상관없이 자신의 효용을 극대화하는 가장 효율적인 네트워크를 선호한다. 본 논문의 최적 네트워크는 출발점으로 다시 돌아올 필요가 없는 오픈 네트워크이고, 참여자는 하나 이상이다.

Roberti and Toth(2012)는 ATSP (Asymmetric Traveling Salesman Problem)의 최적해를 도출하기 위해 비용 최소화 효율적인 모델과 알고리즘을 검토하고, 기본적인 정수선형계획법 (Integer Linear Programming :ILP) 과 분기 한정 (branch and bound) 및 분기 단절 (branch and cut) 알고리즘을 설명하였다. 또한, ATSP를 위한 다항 ILP를 검토하였다.

Chentsov et al.(2016)는 추가된 선행조건에 따라 정의된 반순서 (partial order)에 따라 고정 노드를 방문하는 AGTSP (Asymmetric Generalized Traveling Salesman Problem) 문제의 최적해를 도출하기 위해 Held and Karp 기법을 변형한 동적 계획법 (Dynamic Programming)을 제안하였다. 중국 집배원 배달경로 모델은 주어진 방문 목록상의 도시를 방문하는 데 필요한 경로를 한 번만 방문한다는 가정을 완화하여 최소한 한 번 방문하는 최단 거리 노선을 도출하는 것이다.

Edmonds and Johnson(1973)은 중국 집배원 배달경로 문제의 최적해를 도출하기 위하여 매칭 이론을 제시하였다. 볼록 외피(Convex hull)의 정수해를 다면체 선형계획법으로 설명하고, 비매칭 블라섬(b-matching blossom) 알고리즘을 적용하여 오일러 투어 (Euler Tour) 관련 문제를 설명하였다.

Estevez-Fernandez and Hamers(2020)은 전통적인 중국 집배원 배달경로 모델의 가정에서 집배원이 링크와 노드를 한 번씩만 통과할 수 있다는 조건을 완화하여, 다수의 링크를 통과할 수 있도록 하였다. 그러나, 하나의 링크는 한 명의 집배원이 통과할 수 있다는 조건은 유지하였고, 집배원이 통과하지 않는 링크의 존재를 허용하였다. 이를 통하여 집배원과 링크의 1대1 통과 조건과 집배원 문제의 전체 균형과 하위게임 균형 간의 등식에 중요한 요소라는 것의 무효함을 설명하였다.

이상에서 살펴본 다수의 기존 연구 문헌은 최적화 목적을 방문 판매원 혹은 집배원 등 이동 주체에게 발생하는 이동비용을 최소화하는 것으로 보고 있다. 그러나 본 논문은 도로 네트워크상의 인프라 모니터링 차량의 운행경로를 도출하기 위한 알고리즘을 제안하는 것으로 운행 목적의 최우선 순위는 위험도가 높은 구간을 먼저 주행하는 것이고, 이동에 따른 비용을 최소화하는 것은 두 번째 목적이다.

Araoz et al.(2009)의 연구는 수익과 비용을 고려한 알고리즘을 개발하여, 본 논문과 유사점이 있다. Araoz et al.(2009)는 집배원 경로 탐색 문제의 가정에서 링크 통과 횟수에 제한을 두지 않았지만, 이익 함수를 배정하여 이익을 최적화하는 경로를 도출하도록 하였다. 집배원이 한 개의 링크를 통과하는 데 발생하는 이익은 첫 번째 통과할 때만 실현되며, 두 번째 통과할 때는 비용만 발생하는 것이다. 집배원의 최적 경로는 최대 이익을 실현할 수 있는 최적해를 구하는 것으로, 정수 선형계획법 (linear integer program)을 적용하여 모델을 개발하였다. 최적해를 도출하기 위한 알고리즘은 연산을 두 단계로 진행하고, 단계별로 다른 솔버(solver)를 적용하였으며, 실험을 통해 연산 알고리즘이 작동함을 검증하였다.

그러나, 본 논문의 자율주행 모니터링 차량은 특정 구간을 반복 운행할 때 비용만 발생하는 것은 아니다.

반복 주행을 통해 해당 구간의 위험도를 다시 한번 검토할 수 있으므로, 해당 구간 통행에 따른 보상을 얻을 수 있다는 점에서 차이가 있다.

Ⅲ. 자율주행 모니터링 차량의 경로 탐색 모델과 검증

1. 자율주행 모니터링 경로 탐색 모델

본 논문에서는 위험도가 높은 도로를 먼저 탐색하고 변화가 발생했는가를 탐지하는 것을 최우선으로 두었기 때문에 경로 탐색의 최우선 순위는 위험도가 가장 높은 경로를 먼저 탐색하는 것으로 설정하였다.

자율주행 모니터링 차량은 주어진 노드와 링크를 한 번 이상 통과하여 출발지로 되돌아와야 한다. 모든 노드 n_i 는 노드 세트 I 에 속하고 ($n_i \in I, i = 0, 1, \dots, \infty$), 모든 링크 l_j 는 링크 세트 J 에 속한다. ($l_j \in J, j = 1, 2, \dots, \infty$). 따라서, 자율주행 모니터링 차량의 최적경로 Y 는 $Y \in (I, J)$ 이다.

본 논문에서, 자율주행 모니터링 차량의 최적 배차 경로를 도출하기 위한 최적화 모델은 이익 극대화 모델로 다음의 식 1~3과 같다.

$$\text{최적 배차 경로 } Y = \text{Max} \sum R_{ij} - C_{ij}, \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{s.t. } 0 < R_{ij} \leq 1, \dots\dots\dots (2)$$

$$C_{ij} = \frac{L_{ij}}{\sum_1^k \frac{L_k}{S_k}} \dots\dots\dots (3)$$

- 이때, $R_{ij} = n_i l_j$ 에서 $n_{i+1} l_{j+1}$ 로 이동함에 따른 보상,
- $C_{ij} = n_i l_j$ 에서 $n_{i+1} l_{j+1}$ 로 이동함에 따른 비용,
- $L_{ij} = n_i l_j$ 에서 $n_{i+1} l_{j+1}$ 의 길이(km),
- k = 분할된 구간의 개수,
- L_k = 구간 n 의 길이(km),
- S_k = 구간 k 의 평균 통행속도 (kph) 이다.

2. 가상환경 기반 모델 검증

1) 위험 환경 특성 정의

위험 환경의 발생은 특정 사건(event)에 의해 발생할 수 있으며, 전조 증상 발생에서부터 실제 사건이 발생하는 시공간적 차이와 위험도에 따라 복구 시스템을 적용하거나, 모니터링시스템 적용을 결정할 수 있다. 전조 증상에서 사건 발생 시점 간의 간격이 매우 짧은 사건은 발생 즉시 위험도가 올라가며, 해당 위험도에 따라 현장 복구 시스템 가동해야 한다. 또한 위험 요소 복구 이후에도 결과 확인과 추가 위험 발생 등에 대한 모니터링을 위해 모니터링시스템으로 전환하여 적용할 필요가 있다. 예를 들면, 한 차선을 차단할 수준의 낙

하물이 떨어진다면 발견 즉시 이를 해소해야 하며, 추가적인 위험이 발생하지 않는지 지속적인 모니터링이 필요하다.

전조 증상 발생에서부터 사건 발생까지 시간 경과에 따라 위험도가 점증하는 환경은 전조 증상 발견 시부터 복구 시스템 가동 직전까지 해당 위험 수준을 관찰하기 위한 모니터링시스템 적용이 필요하다.

도로 노면 상의 전조 증상이 발견된 이후 모니터링의 빈도는 전조 증상의 위험도 변화에 따라 조정해야 한다. 예를 들면, 도로 노면 상의 포트홀, 노면 마크의 선예도 등은 도로포장과 노면 도색 시점부터 지속해서 품질 저하가 이루어진다. 품질 저하가 임계점에 도달하면 복구가 이루어져야 하며, 이를 위해 상시 관찰이 필요하다. 이처럼 위험 요소의 종류와 특성, 영향의 범위와 대상에 따라 위험도를 구분하고 모니터링 주기를 결정할 필요가 있다.

2) 가상환경의 도로교통 환경 정의

가상환경을 기반으로 하여 효율적으로 도로 품질과 위험 요소를 관찰하기 위한 도로교통 환경을 정의할 필요가 있다. 본 논문의 가상환경은 노드-링크 기반의 일반적인 도로 네트워크로 구성되며, 위험도는 노드-링크 상에 양의 정수로 지정하는 것을 가정하였다. 위험도의 수준은 평상, 위험, 그리고 매우 위험 등 6단계의 위험도를 설정해 볼 수 있다. 평상시의 위험도는 1이고, 가장 위험한 상황은 6으로 사건의 발생 바로 직전의 상황이라고 가정하였다. 각 노드-링크에 부여되는 위험도 1~6 중 어느 하나에 포함될 확률은 0보다 크고 1보다 작거나 같다.

도로 네트워크는 신호 교차로가 있는 도시부 도로를 가정하였다. 링크 길이는 노드-링크 특성에 따라 상이하다. 자율주행 차량의 운행속도는 모니터링 결과의 품질을 일정 수준으로 유지하는 데 필요한 속도를 유지한다. 이에 따라 서비스 수준이 높은 도로에서 다른 차량의 통행속도는 자율주행 차량의 통행속도와 같거나 빠르다. 반면, 도로 서비스 수준이 낮은 경우, 자율주행 차량의 통행속도는 해당 구간의 평균 통행속도로 운행한다.

3) 도로 운행의 비용과 보상체계

자율주행 모니터링 차량은 주어진 일정 범위의 노드와 링크를 1회 이상 빠짐없이 운행해야 하며, 차고지에서 시작하여 1회 주행 후 다시 차고지로 복귀해야 한다.

도로 인프라 상의 위험 요소를 모니터링하기 위해 자율주행차는 위험도가 높은 노드-링크를 먼저 운행해야 한다. 이를 위해, 1회 주행 후 차고지로 복귀할 때까지 통과한 노드-링크의 비용 대비 편익을 합하여 운행의 보상을 최대한 얻을 수 있도록 운행경로를 선택 필요가 있다.

이에 따라 주어진 위험도가 높은 노드-링크를 운행하는 것이 가장 높은 보상을 받을 수 있도록 보상체계를 설정하였다. 위험도가 6인 노드-링크를 통행한 경우의 보상은 위험도가 1인 노드-링크를 통과한 통행보다 높다고 본다. 다시 말하면, 노드-링크 상의 위험도 체계는 보상체계와 같다고 보았다.

노드-링크를 통과하기 위한 비용은 운행하는 도로 링크의 길이와 평균 통행속도와 비례하며, 본 논문에서는 도로교통 서비스 수준 (LoS: Level of Service)'를 참고하여 설정하였다.

도로교통 서비스 수준은 도로 설계용량 대비 운행 차량의 밀도 수준을 지표화한 것으로 국내 도로용량 서비스 수준은 Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2013)에서 정하고 있다. Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2013)에서는 <Table 1>과 같이 대상 구간을 도로의 특성에 따라 자유주행, 교차로 등으로 구분하고, 부문별 평균 속도를 구한 뒤 전체 대상 구간의 평균 통행속도로 환산하여 서비스 수준을 평가하고 있다.

<Table 1> Methods for determine level of service

$S_i = \frac{L}{\sum_1^n \frac{L_n}{S_{n,i}}}$	$S = \frac{L}{\sum_1^n \frac{L_n}{S_n}}$
Where, S_i = boundary value of LoS i for the whole link (Average travel speed, kph) L = length of the whole link (km) n = number of segment L_n = length of n segment (km) $S_{n,i}$ = boundary value of LoS i for n segment (Average travel speed, kph)	Where, S = Average travel speed of the whole link (kph) L = length of the whole link (km) n = number of segment L_n = length of n segment (km) S_n = Average travel speed of n segment(kph)

Source: Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(2013), “Highway Capacity Manual”, p.146.

2km 구간 내 신호 교차로가 0.5개 이상 있는 도로구간에서의 서비스 수준은 A ~ E까지 6단계로 구분되며, 그 기준은 <Table 2>와 같다. 본 논문의 비용은 <Table 2>의 비용 수준을 적용하고자 한다.

<Table 2> Level of service and cost level

Cost level	Level of Service	Total delay rate (%)	Average Speed(kph)	
			70	60
1	A	≤ 15	≥ 65	≥ 55
2	B	≤ 25	≥ 55	≥ 45
3	C	≤ 40	≥ 45	≥ 40
4	D	≤ 50	≥ 40	≥ 30
5	E	≤ 60	≥ 35	≥ 25
6	F	> 60	< 35	< 25

Source: Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(2013), “Highway Capacity Manual”, p.169.

* Authors devised cost level based on the source.

앞서 설명한 비용함수의 평균 통행속도는 구간 전체의 평균 통행속도 기준을 설정하는 서비스 수준이며, 평균 통행속도에 따른 비용 수준이 1 ~ 6의 수준이 될 확률은 0보다 크고 1과 같거나 작다.

3. 토이 네트워크를 활용한 모델 검증

자율주행 모니터링 차량의 최적 경로 선택 모형의 해가 존재함을 알아보기 위해 노드와 링크 체계를 모사한 토이 네트워크를 구축하여 모델의 유효성을 검증하였다. 대조 모델로 중국 집배원 배달경로 모델을 선정하였고, 같은 토이 네트워크에서 중국 집배원과 자율주행 모니터링 차량의 경로를 비교하였다.

<Fig. 1>과 <Fig. 2>에서 보는 바와 같이 토이 네트워크는 최대한 현실 도로 네트워크를 반영할 수 있도록 방향성이 존재하는 비대칭형의 네트워크이며, 집배원 혹은 자율주행 차량은 모든 노드-링크 상의 정보를 알고 있다고 가정하였다. 집배원과 자율주행 차량은 모든 노드-링크를 한 번 이상 방문하고 출발점으로 복귀해야 한다. 분석의 편의를 위해 출발점은 1번에서 출발하는 것을 가정하였고, 하나의 노드-링크 세트를 1회 이

상 이용할 수 있도록 자유도를 높여 최적해를 도출할 수 있도록 하였다. 따라서 최적 경로는 가장 낮은 이동 비용을 발생시키며, 중복되는 경로가 적은 경우를 최적 경로로 선택하였다.

이를 도식화하기 위하여 위험도가 가장 높은 경로를 6으로 두고, 가장 정상적인 상태를 유지하는 경로를 1로 두어 총 6단계의 보상체계를 고안하였다. 두 번째 고려할 사항은 노드-링크를 통과하는데 발생하는 비용을 최소화해야 한다는 것이다. 노드-링크를 통과하는데 발생하는 비용은 링크의 길이, 통행 차량의 수에 비례한다고 할 수 있다. 그러나, 해당 링크를 통과하는 평균 통행속도를 모델에 대입할 때 평균 속도와 보상 단위의 이질감으로 인해 비교하는 데 어려움이 발생한다. 직접 비교를 위해 평균 통행속도를 도식화할 필요가 있으며, 해당 링크의 서비스 수준을 바탕으로 설정하였다. 평균 통행속도가 실제 속도에 비해 매우 낮아서 서비스 수준이 높은 경우는 링크 통과 비용이 가장 낮고, 서비스 수준이 낮은 경우는 통과 비용이 가장 높은 것으로 가정하였다. <Table 2>에서 보는 바와 같이 링크 통과 비용 수준은 가장 낮은 1에서부터 가장 높은 6의 수준으로 총 6단계의 비용 체계를 고안하였다.

<Fig. 2>의 자율주행 차량 배차 네트워크에는 노드-링크 2-4, 5-3, 5-6의 위험도를 6단계의 최고 수준으로 배정하고, 나머지 노드-링크의 위험도는 1로 같다고 가정하였다. 이에 따라 자율주행 차량은 비용을 고려하여 보상이 최대가 되도록 진행한다. 반면, <Fig. 1>의 중국 집배원 네트워크에는 도로 인프라 위험도를 설정하지 않았기 때문에, 비용 최소화를 목적으로 진행하게 된다.

토이네트워크를 이용하여 모델의 유효성을 검증하기 위해 보상과 비용함수를 변형한 모형은 아래 식 4~7과 같다.

$$\text{최적 배차 경로 } Y = \text{Max} \sum R_{ij} - C_{ij}, \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{s.t. } 1 \leq R_{ij} \leq 6, \dots\dots\dots (5)$$

$$C_{ij} = \frac{L_{ij}}{\sum_1^k \frac{L_k}{S_k}} = \left\{ \begin{array}{l} 1, \text{ if } C_{ij} \geq 65 \\ 2, \text{ if } C_{ij} \geq 55 \\ 3, \text{ if } C_{ij} \geq 45 \\ 4, \text{ if } C_{ij} \geq 40 \\ 5, \text{ if } C_{ij} \geq 35 \\ 6, \text{ if } C_{ij} < 35 \end{array} \right\} \text{ 설계통행속도가 70kph 일 때, } \dots\dots\dots (6)$$

$$\text{혹은 } C_{ij} = \frac{L_{ij}}{\sum_1^k \frac{L_k}{S_k}} = \left\{ \begin{array}{l} 1, \text{ if } C_{ij} \geq 55 \\ 2, \text{ if } C_{ij} \geq 45 \\ 3, \text{ if } C_{ij} \geq 40 \\ 4, \text{ if } C_{ij} \geq 30 \\ 5, \text{ if } C_{ij} \geq 25 \\ 6, \text{ if } C_{ij} < 25 \end{array} \right\} \text{ 설계통행속도가 60kph 일 때이다. } \dots\dots (7)$$

- 이때, $R_{ij} = n_i l_j$ 에서 $n_{i+1} l_{j+1}$ 로 이동함에 따른 보상,
- $C_{ij} = n_i l_j$ 에서 $n_{i+1} l_{j+1}$ 로 이동함에 따른 비용,
- $L_{ij} = n_i l_j$ 에서 $n_{i+1} l_{j+1}$ 의 길이(km),
- k = 분할된 구간의 갯수 ($k = 1$),
- L_k = 구간 n 의 길이(km),
- S_k = 구간 k 의 평균 통행속도 (kph) 이다.

논문에서 제안한 최적 알고리즘을 이용하였을 때 자율주행 최적 경로에서 위험 도가 높은 노드-링크를 얼마나 빠르게 통과하였는가를 Eiselt et al.(1995)의 중국 집배원 배달경로 알고리즘의 결과와 비교하였다.

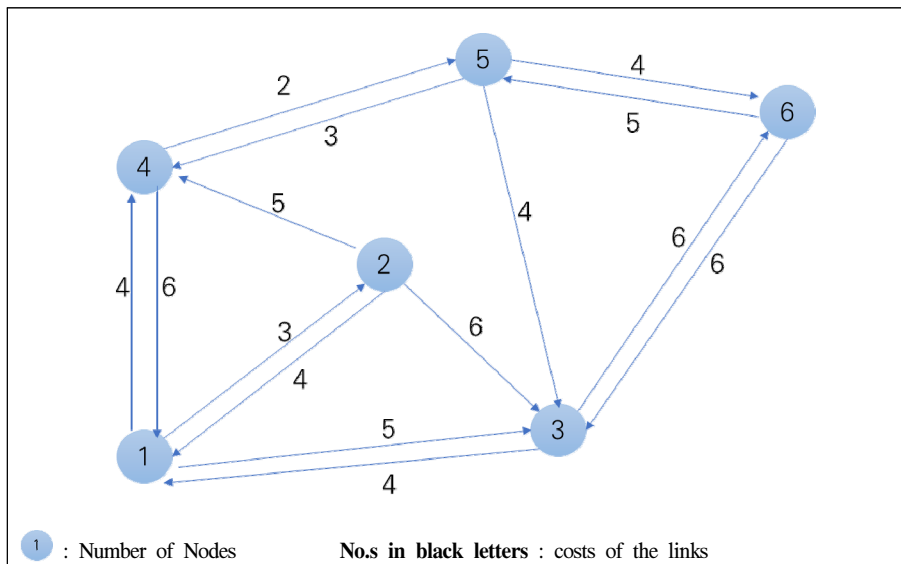
Eiselt et al.(1995)는 방향성이 있는 중국 집배원 배달경로 알고리즘을 식 8~11와 같이 설명하였다. 이때, I 는 들어오는 방향의 링크가 나가는 방향의 링크보다 s_i 만큼 많은 노드 v_i 의 세트이고, J는 들어오는 방향의 링크보다 나가는 방향의 링크가 d_i 만큼 많은 노드 v_j 의 세트이다. c_{ij} 는 노드 v_i 에서 노드 v_j 의 최단 거리 경로이다. 여기에서 최적 χ_{ij} 값은 해당 노드-링크를 한 번 이상 초과하여 통과한 횟수와 같다.

$$\text{Minimize} \quad \sum_{v_i \in J} \sum_{v_j \in J} c_{ij} \chi_{ij} \dots\dots\dots (8)$$

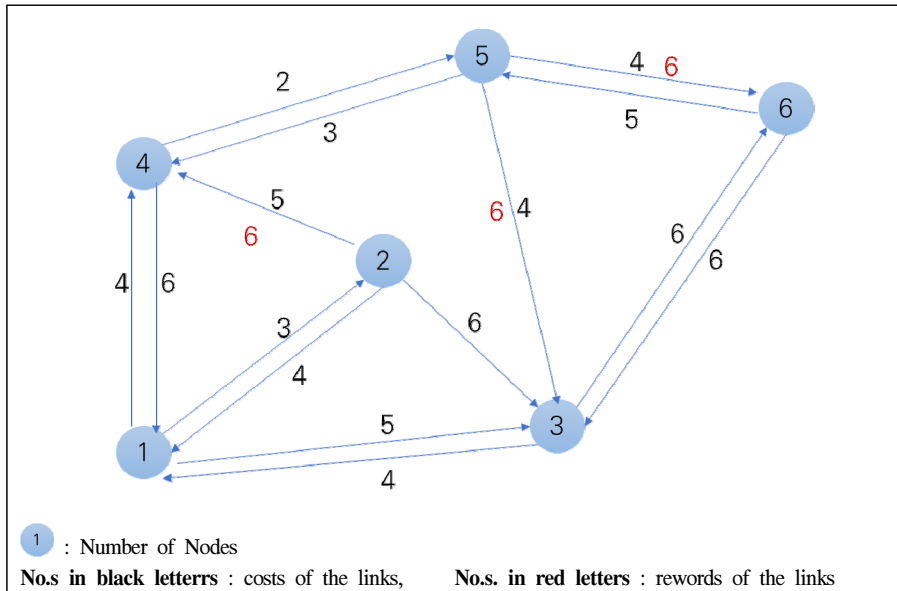
$$\text{subject to} \quad \sum_{v_j \in J} \chi_{ij} = s_i \quad (v_i \in I) \dots\dots\dots (9)$$

$$\sum_{v_i \in I} \chi_{ij} = d_j \quad (v_j \in J) \dots\dots\dots (10)$$

$$\chi_{ij} \geq 0 \quad (v_i \in I, v_i \in J) \dots\dots\dots (11)$$



<Fig. 1> Chinese postman delivery network



<Fig. 2> Road infrastructure monitoring network

분석의 결과 <Table 3>에서 보는 바와 같이, 중국 집배원의 최적 배달경로의 노드-링크 이동회수는 총 20 회이고, 발생 비용은 83이다. 노드-링크 1-2와 3-1은 각각 3회 이동하였고, 노드-링크 4-5는 2회 이동하였다.

<Table 3> Optimal delivery route for Chinese postman and total costs

Starting node	Passing node	Cost of the link	Sequence of moving	Total number of steps	Total costs
1	2	3	1, 16, 18	3	9
1	4	4	6	1	4
1	3	5	10	1	5
2	4	5	2	1	5
2	1	4	17	1	4
2	3	6	19	1	6
3	1	4	9, 15, 20	3	12
3	6	6	11	1	6
4	1	6	5	1	6
4	5	2	3, 7	2	4
5	4	3	4	1	3
5	3	4	8	1	4
5	6	4	13	1	4
6	5	5	12	1	5
6	3	6	14	1	6
Total				20	83

<Table 4>와 같이 자율주행 모니터링 차량 최적 배차 경로의 노드-링크 이동회수는 총 20회이고, 발생 비용은 83이며, 보상은 35이다. 중국 집배원 배달 최적경로와 마찬가지로 노드-링크 1-2와 3-1은 각각 3회 이동

하였고, 노드-링크 4-5는 2회 이동하였다.

위험도가 높은 노드-링크의 이동 순서를 비교해 보면, 자율주행 모니터링 차량 최적 배차 경로에서 위험도가 높은 노드-링크인 2-4 는 2번째 이동하였고, 5-3는 4번째, 5-6는 8번째에 이동하였다. 반면, <Table 3>의 중국 집배원 배달경로에서는 위험도가 높은 2-4는 2번째 이동하였고, 5-3는 8번째, 5-6은 13번째 이동하였다.

전반적으로 같은 이동 횟수와 발생 비용을 고려하였을 때, 본 연구에서 개발한 최적화 알고리즘에서는 위험도가 높은 노드-링크를 먼저 이동한 것으로 나타났다.

<Table 4> Optimal monitoring route for automated vehicles and total costs and reward

Starting node	Passing node	costs	reward	Sequence of moving	Total number of steps	Total costs	Total reward
1	2	3	1	1, 16, 19	3	9	3
1	4	4	1	6	1	4	1
1	3	5	1	12	1	5	1
2	4	5	6	2	1	5	6
2	1	4	1	20	1	4	1
2	3	6	1	17	1	6	1
3	1	4	1	5, 15, 18	3	12	3
3	6	6	1	13	1	6	1
4	1	6	1	11	1	6	1
4	5	2	1	3, 7	2	4	2
5	4	3	1	10	1	3	1
5	3	4	6	4	1	4	6
5	6	4	6	8	1	4	6
6	5	5	1	9	1	5	1
6	3	6	1	14	1	6	1
total					20	83	35

IV. 결론 및 향후 과제

본 논문은 자율주행차의 운행에 영향을 미치는 도로 인프라의 위험 요소를 관리하기 위한 자율주행 모니터링 차량의 최적 경로를 도출하기 위한 최적화 알고리즘을 제안 하였다. 일반적인 경로 최적화 알고리즘은 비용 최소화를 기반으로 하고 있다. 예를 들면, 수요대응형 모빌리티 서비스 제공을 위한 최적 경로 선정에 있어, 승객이 있는 장소까지 최단 거리로 빠르게 찾아가는 경로를 찾는 것이 일반적 최적화의 대표사례라고 할 수 있다. 이때 출발지에서 목적지까지 찾아가는데 발생하는 비용은 운행 거리와 차량 지·정체 등으로 인해 발생하는 시간 비용이며, 이를 최소로 발생시키는 노선을 선택하는 것이 최적 경로라고 할 수 있다. 그러나, 본 논문에서는 보상 최대화 알고리즘을 제안하였다. 본 알고리즘에서 이익은 위험한 경로를 우선 탐색하는 경우 높은 보상을 받는 것으로 가정하였다. 반면, 위험 탐색을 위해 통과하는 도로 링크의 길이, 통행량, 통행속도 등 도로교통 특성에 따른 비용이 발생한다고 보았다.

이후, 토이 네트워크를 구성하여 자율주행차 보상 최대화 알고리즘과 중국 집배원 배달경로 알고리즘을 비교하였다. 이를 위하여, 도로 인프라 위험 요소의 관리 편의를 위해 단계화한 자료를 활용해야 한다는 현실적인 확장성을 고려하여 보상과 비용 체계를 6단계로 구분하였다. 특히 비용 체계는 도로의 서비스 수준

을 고려하여 단계화했다. 중국 집배원 배달경로 알고리즘은 비용 최소화 알고리즘으로 노드-링크 통과 시 발생하는 비용을 최소화하고 있다. 반면 자율주행 보상 최대화 알고리즘의 노드-링크는 중국 집배원 배달경로 알고리즘과 같은 비용이 발생하지만, 보상도 같이 발생하도록 구성하였다. 또한 토이 네트워크의 복잡성을 최소화하여 3개의 링크에 최대 보상을 배정하였다.

분석 결과 자율주행 보상 최대화 알고리즘은 중국 집배원 배달경로 알고리즘과 비교해 노드-링크 횟수와 비용은 같았다. 그러나 관심 대상인 보상이 높은 3개의 링크는 좀 더 빠르게 통과하여 토이 네트워크상의 유효성이 있는 것으로 나타났다.

그러나 본 논문은 현장에서 수집된 데이터를 기반으로 검증한 것이 아니라 토이 네트워크상에서 알고리즘의 유효성을 설명한 것으로, 실제 자율주행 도로 모니터링 차량 배차에 적용하기에는 한계가 있다. 향후 실제 도로네트워크에 적용하여 결과가 유효한지 검증해 볼 필요가 있다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 국토교통부 자율주행 기술개발 혁신사업의 연구비 지원(과제 번호: 22AMDP-C161991-02)에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- Araoz, J., Fernandez, E. and Meza, O.(2009), “Solving the prize-collecting Rural Postman Problem”, *European Journal of Operational Research*, vol. 196, pp.886-896.
- Chentsov, A., Khachay, M. and Khachay, D.(2016), “Linear time algorithm for Precedence Constrained Asymmetric Generalized Traveling Salesman Problem”, *IFAC-Papers Online*, 49-12, pp.651-655.
- Edmonds, J. and Johnson, E. L.(1973), “Matching, Euler Tors and the Chinese Postman”, *Mathematical Programming*, vol. 5, pp.88-124.
- Eiselt, H. A., Gendreau, M. and Laporte, B.(1995), “Arc Routing Problems, Part I: The Chinese Postman Problem”, *Operational Research*, vol. 43, no. 2, pp.231-242.
- Estevez-Fernandez, A. and Hamers, H.(2020), “Chinese postman games with multi-located players”, *European Journal of Operational Research*, 285, pp.458-469.
- Hernandez, P., Peris, J. E. and Vidal-Puga, J.(2022), “A non-cooperative approach to the folk rule in minimum cost spanning tree problems”, *European Journal of Operational Research*, Online.
- Kim, K. O., Choi, J. M. and Cho, S. A.(2022) “A study on the methods for managing hazard factors to support operation of automated driving vehicles in perspective of road infrastructure”, *The Journal of the Korea Institute of Intelligent Transportation System*, vol. 21, no. 2, pp.62-73.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2013), *Highway capacity manual*, pp.146-169.
- Roberti, R. and Toth, P.(2012), “Models and algorithms for the asymmetric traveling salesman problem: An experimental comparison”, *EURO Journal on Transportation and Logistics*, vol. 1, pp.113-133.