

동기화 기반 City-Wide PRT의 최적경로설정 방안 연구

On the Optimal Vehicle Routing of City-Wide PRT based on Synchronization

김동희† 이태윤*
Dong-Hee Kim Tae-Yun Lee

ABSTRACT

Recently, there are environmental issues for sustainable transportation system to pursue the energy-efficient and environment-friendly public urban transit. These transportation system needs to offer demand-oriented high-quality service being on the same level with cab service for urban space. PRT(Personal Rapid Transit), small track-guided vehicle, is repeatedly mentioned as a possible alternative for the new urban public transportation system, but but there are not many researches on the operational optimal routing for PRT network.

In this paper, the concept of PRT and general optimal routing methods are reviewed. And we suggest the optimal routing method for city-wide PRT network with multi-vehicles and stations, junctions and directional arcs. Further research directions for PRT routing are presented.

1. 서론

최근 이슈가 되고 있는 환경문제에 대응하기 위하여 지속가능한 교통수단으로서 친환경적이고 에너지 소비가 적은 궤도수송수단의 역할이 재조명 되고 있다. 특히, 도심 공간을 최대한 활용하며 택시 수준의 편의성을 제공하고, 환경친화성을 가진 미래형 대중교통 시스템에 대한 필요성이 증가하면서 소형궤도 차량인 PRT(Personal Rapid Transit)를 국내에 도입하기위한 연구가 진행되고 있다. 그러나 PRT의 실제 구축을 위해서는 접근, 대기 및 이동시간과 같은 승객 측면에서의 편의성과 효율성을 갖춘 운영방식에 관한 충분한 검토가 필요하다. 현실 상황에서 PRT는 수많은 다양한 패턴의 수요를 대상으로 하는 반면에 궤도기반이라는 path의 제약으로 인해 도로에서와 같은 트래픽 정체현상이 발생할 수 있다.

그러나 PRT 운영을 위한 수요기반의 최적경로설정 및 트래픽 분산과 관련된 연구는 미비한 상태이다. 본 논문에서는 동기화 방식의 PRT시스템을 대상으로 차량 및 네트워크 복잡도에 따른 최적경로설정 방안을 제시하고자 한다.

2. 이론적 고찰

PRT시스템은 고수준의 서비스를 제공하는 궤도기반 대중교통수단으로 시스템 운행제어방식에 따라 그 특성과 효율이 차이가 나게 된다. 본 장에서는 PRT시스템의 개요와 대표적인 운행제어방식, 그리고 일반적인 네트워크상의 최적경로탐색 방법을 살펴본다.

2.1 PRT 시스템 개요

PRT시스템은 짧은 운전시격을 유지하면서 2~4명 정도의 승객을 소형궤도차량으로 출발지부터 목적지까지 정체없이 수송하는 고급형 궤도 대중교통수단이다. 1970년대 초 소형궤도차량에 대한 연구와 네트워크 분석 기초가 마련된 이후 미국 버지니아주에서 최초로 실용화 개발된 PRT는 복잡한 교통수요와 환경 및 에너지 문제 해결에도 적절히 대처할 수 있는 차세대 교통시스템으로 미국, 일본, 영국 등 선진

† 정회원, 한국철도기술연구원, 교통물류, 선임연구원
E-mail : kdh007@railway.or.kr
TEL : (031)460-5483 FAX : (031)460-5021
* 정회원, 한국철도기술연구원, 교통물류, 연구원

국을 중심으로 기술 개발이 진행되어 왔다. 대표적인 해외사례로는 Taxi2000(미국), ULTRA(영국) 등이 있으며, 국내에서도 PRT Korean(1993), Vectus(2004), 철기연(2005)에서 개발 완료 혹은 진행중이다. 차체가 경량이기 때문에 궤도 역시 경량구조로 설치될 수 있어 지하철의 1/10 수준, 경량전철의 1/6 수준의 건설비로 도입가능하다. 수송능력은 버스와 경전철의 중간규모로 노선확장이 용이하며, 승객 요구에 맞춰 운행되는 택시와 같은 on-demand 수송개념을 가지고 있다.

2.2 PRT 구축을 위한 운행제어방식

PRT 시스템 운영에 있어서 동기화 기반과 비동기화 기반의 차량운행제어방식이 있다. 동기화 방식은 선로를 가상의 구간(sector)으로 나누어 차량을 빈 공간에 투입하게 된다. 차량의 길이, 속도, 제동거리, 여유거리 등을 고려하여 한 구간의 크기를 정한다. 목표차량을 투입할 수 있는 구간이 탐색되어도, 타 차량의 합류를 고려하여 역에서의 대기여부를 결정하게 된다. 이는 점 추종(point follow)방식으로도 불린다.

비동기화 방식에서는 차량을 선로에 우선 투입하여 앞 차량의 속도와 거리를 고려하여 투입 차량의 속도 및 제동거리, 여유거리를 조정하여, 특정 선로에 차량이 집중되는 상황이 발생하면 이동속도가 저하될 수 있다. 이는 차량 추종(vehicle follow)방식으로도 불린다.

항 목 \ 방 식	점 추종 (Point Follow) 방식	차량 추종 (Vehicle Follow) 방식
차량간 거리유지 방식	이동 폐색 방식	폐색 무관
동기 방식	동기식 제어	비 동기식 제어
제어의 집중성	중앙제어에 의한 집중제어(속도 프로파일을 중앙제어시스템에서 생성)	지역하부 시스템에 의한 분산제어(속도 프로파일을 차상제어시스템에서 개별적으로 생성)

그림 1. PRT의 대표적 운행제어방식

2.3 네트워크 최적경로탐색

일반적으로 네트워크상에서 최적경로탐색은 최단경로문제(shortest path problem)로 표현된다. SPP 문제는 노드(node)와 방향성을 갖는 아크(directed arc) 및 아크비용(arc cost)을 갖는 네트워크 상의 출발지(source node)에서 도착지(destination node)까지 가장 짧은 경로(path)를 찾는 문제이다. 일반적인 SPP 문제해결을 위한 효율적인 최적해 알고리즘은 개발되어 있다. 특정 두 교점간의 최단경로는 Dijkstra algorithm, 모든 교점쌍간 최단경로를 동시에 찾는 Floyd-Warshall algorithm, 두 교점간의 K 개 최단경로를 찾는 Shier algorithm 이 대표적이다. 효율적 알고리즘이라 함은 문제크기가 증감함에 따라 최적화 계산량이 지수적(exponential)으로 증가하지 않고 다항식(polynomial)으로 증가하는 알고리즘을 말한다. 위의 대표적 알고리즘은 각각 $O(N^2)$, $O(N^3)$, $O(KN^3)$ 의 복잡도(complexity)를 가진다. 그러나 순환발생 네트워크나 음수 아크비용을 갖는 등 비일반적인 SPP 문제는 아직까지 효율적 알고리즘이 알려져 있지 않다.

PRT 시스템의 실 운행상황에서 요구되는 탐색소요 실시간 시간제약(real-time restriction)은 최적경로탐색의 문제정의 및 알고리즘 결정에 중요하다. 계산주기(data communication - data processing - optimal path finding - data processing - data communication)의 제약에 따라 최적화 기법(optimal) 혹은 근사해 기법(near optimal)의 결정이 필요하다. 예를 들어, 실제 도로와 같이 복잡하고 불확정적 상황에서는 최단경로를 찾기 위한 근사해 알고리즘의 하나로 A* 알고리즘을 사용하고 있다.

3. 동기화기반 City-Wide PRT 최적경로탐색 방안

3.1 연구대상 및 범위





네트워크가 복잡한 상황과 단순한 상황, 다수의 차량이 동시에 운행되는 경우와 소수의 차량이 운행되는 경우를 고려한 City-Wide PRT를 대상으로 하여 동기화 기반의 최적경로탐색 방안을 제시한다.

3.2 기본가정

연구의 동기화 기반 PRT 최적경로 알고리즘을 설명하기에 앞서 다음의 기본 전제조건이 필요하다.

- 1) 경로에 투입된 차량은 정차하거나 지체되지 않는다
- 2) 차량의 이동 속도는 동일하며 거리와 시간이 비례한다
- 3) 이동중인 모든 차량(공차 포함)은 목적지가 정해져 있다
- 4) 이동중인 모든 차량은 목적지까지 경로가 확정되면 이후에 변경되지 않는다
- 5) 출발이 확정된 차량은 목적지까지 경로가 확정되어 이후에 변경되지 않는다
- 6) 도착지에서는 항상 역에 진입/정차할 수 있다.

표 1. 기호설명

기 호	설 명
== == == ==	후보경로본선
— — — —	본선(합류본선포함)
--- ---	본선에 간섭하지 않는 측선(대기선)
--- ---	본선에 간섭하는 측선(대기선)
	목적지 비확정 대기 차량
	목적지 확정 영차로 이동 중인 차량
	목적지 확정 공차로 이동 중인 차량
	목적지 확정 대기 차량

3.3 사용기호 및 약어

알고리즘의 설명에서 사용된 약어는 다음과 같다.

- | | |
|--|--|
| <p>N : 역, 분기/합류점 등 노드집합 ,</p> <p>ST : 아크를 구성하는 가상폐색 섹터집합 ,</p> <p>C_{ij} : 노드 i, j 사이의 아크비용 ,</p> <p>N_{rj} : 후보경로 r 에 포함된 j 번째 노드 ,</p> <p>GST_r : 후보경로 r의 섹터집합</p> <p>RST_{ri} : 투입차량 경로의 차량기준 i 번째 섹터</p> <p>VST_{vj} : 타차량 경로의 차량기준 j 번째 섹터</p> <p>RO_{rd} : 후보경로 r에서 목적지 기준 거리가 d 인 섹터의 차량 점유상태</p> | <p>A : 모든 이웃 노드간의 아크집합</p> <p>R : 특정 출발/목적지간의 후보경로 집합</p> <p>TR_r : 후보경로 r 의 거리비용</p> <p>TD_r : 후보경로 r 의 차량 투입가능시점</p> <p>GST_v : 타차량 경로 v의 섹터집합</p> |
|--|--|

알고리즘의 설명에서 사용된 기호는 표 1과 같다.

3.4 동기화기반 PRT를 위한 최적경로탐색

본 알고리즘의 목적은 목적 차량이 출발지에서 도착지까지 가장 빠른 시간에 이동하도록 경로를 선정하는 것이다. 동기화 방식에서는 출발지/도착지 간의 거리 TR 과 출발지에서 차량투입가능시점 TD 를 합한 값이 총소요시간이 되며, 가능한 후보 경로 중에 $\{TD_r + TR_r\}$ 값이 최소인 경로가 최적경로이다.

알고리즘은 크게 네 단계로 구성된다 ; 1) 출발지/목적지 간 후보경로를 탐색, 2) 후보경로별 TR_r 계

산, 3) 후보경로별 TD_r 계산, 4) $\min(TD_r + TR_r)$ 인 최적경로 선택.

1) 출발지/목적지 간 후보경로를 탐색

제한된 노드(역)와 방향성을 가지는 아크(노선)로 인해 출발지에서 목적지까지의 경로의 수가 제한되지만 City-Wide 형태 혹은 격자형 구조인 PRT 노선의 경우 후보경로의 수가 다수 존재할 수 있다. 후보 경로 : R_1, R_2, \dots, R_r , 단 $R_r = \{N_{r,j}\}$, $j : R_r$ 에 포함된 노드수. 그림 2에서는 출발지에서 목적지까지 상방향성만 갖는 경우 가능한 경로가 4개인 예를 보여주고 있다.

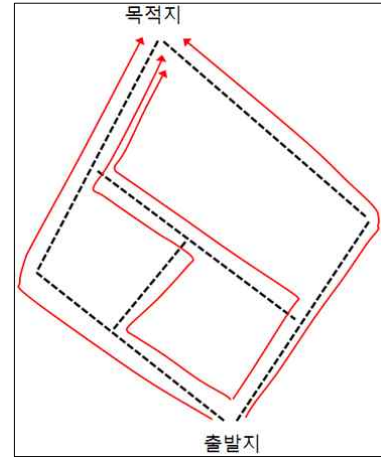


그림 2. 4개의 후보경로를 갖는 경우

만약 단순 네트워크 구조인 경우에는 경우의 수가 많지 않으므로 단순 나열법에 의해 후보경로를 모두 탐색하면 되며, 네트워크가 복잡하여 다수의 후보경로가 가능한 경우에는 시간제약을 고려하여 k-OPT와 같은 상순위 k 개의 TR 최단경로만을 고려하는 방안도 가능하다.

2) 후보경로별 TR_r 계산

1) 단계에서 복잡 네트워크여서 k-OPT 방법을 사용한 경우 본 단계를 생략하고 다음 단계로 넘어간다. 그렇지 않을 경우 TR 값을 산출하기 위하여 모든 후보경로별로 다음 계산을 수행한다.

$$TR_r = \text{sum} \{ C_{-N_{r,j}} N_{r(j+1)} \}, j : 1, \dots, (R_r \text{ 내 노드수} - 1)$$

3) 후보경로별 TD_r 계산

1), 2) 단계의 후보경로별 TD_r 계산을 위해서는 후보경로에 영향을 미치는 주변경로들과 타차량을 고려하여 투입가능 시점을 계산하여야 한다. 타 차량이 후보경로 상에 존재하지 않지만 합류점 이후 간섭이 발생 가능하기 때문에 간섭 가능한 타차량을 후보경로에 투영시키는 과정을 거쳐 경합 시점을 찾는다. 우선 투영을 위해서는 후보경로와 간섭 가능한 타 차량경로를 선별하고 이들 경로상에 존재하는 차량들을 가상 후보경로 상에 모두 투영시킨다. 타 차량이 모두 투영된 가상후보경로를 TR_r 만큼 진행시킨 후, TD_r 시점을 찾는다.

3-1) 가상 후보경로 생성

출발지에서의 실제 거리는 TR_r 이지만 간섭을 미치는 타차량이 후보경로에 영향을 미치는 시점을 추정하기 위하여 출발지 이전의 가상 섹터경로를 포함한 후보경로를 그림 3과 같이 생성한다.



그림 3 가상의 후보경로

3-2) 가상후보경로에 영향을 미치는 차량 선별

후보경로(투입차량)의 출발지부터 목적지까지의 섹터 중 타차량의 경로가 공유하는 섹터가 하나 이상 일 때 합류예정차량으로 선별한다. 이를 위해 후보경로의 섹터집합 $GST_r = \{RST_{r,i}\}$ 과 타차량 경로의 섹터집합 $GST_v = \{VST_{v,j}\}$ 을 비교하여 판단한다. 타차량 역시 투입가능 시점을 고려하여 최적경로를 산출하기 때문에 그림 4와 같이 합류예정지역이 한 지점 이상 발생할 수 있다.

if $GST_r \ni VST_{v,j}$ then GST_v 는 영향을 미치는 타차량 경로
else GST_v 는 영향을 미치지 않는 타차량 경로

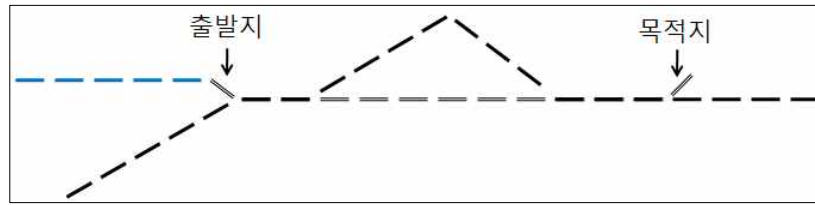


그림 4 영향을 미치는 타차량경로의 예

3-3) 합류예정 차량을 후보경로에 투영

후보경로에서의 전체섹터에 대하여 점유상태를 비점유상태($RO_{rd} = 0$)로 초기화하고, 타차량 투영시 점유상태($RO_{rd} = 1$)로 기록한다. 목적지를 기준으로 후보경로 섹터와 타차량경로가 공유하는 섹터 직후의 구간이 타차량의 합류구간이 된다. 즉, $RST_{ri} = VST_{vj}$ 와 $RST_{r(i+1)} \neq VST_{v(j+1)}$ 를 동시에 만족할 때 $VST_{v(j+1)}$ 가 합류지점이 된다. 따라서 타차량은 목적지 기준으로 후보경로의 $(TR_r - i) + (j + 1)$ 의 위치에 투영된다. 차량의 투입가능시점 이전에 투영된 타차량은 투입차량에 영향을 미치지 못하기 때문에 투영된 전체 차량을 TR_r 만큼 전진시키고, 목적지에서 $j - i + 1$ 거리의 섹터가 점유되어 있는 상태 ($RO_{r(j-i+1)} = 1$)로 바뀌게 된다. 위의 과정을 3-2)에서 선별된 차량 경로에 대하여 반복적으로 수행하면 그림 7와 같은 형태로 투영된다.



그림 5. 합류구간에서의 가상 후보경로 점유효과

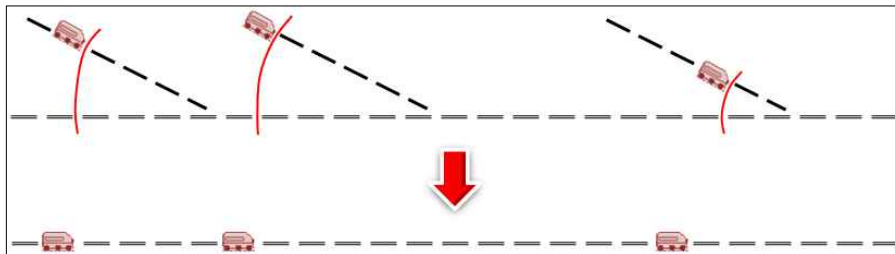


그림 6. 후보경로에 합류예정차량들 투영결과



그림 7. TR_r 값만큼 전진 후 상태

3-4) 후보경로의 TD_r 산출

차량 투입시점인 TD_r 는 RO_{rd} 에서 $RO_{rd} = 0$ 을 만족하는 가장 작은 d 값이 TD_r 가 된다. 그림 7에서는 TR_r 값이 9가 된다.

```

for d =  $TR_r$  to  $\infty$ 
    if  $RO_{rd} = 0$  then  $TD_r = d$  exit for
next d

```

4) $\min(TD_r + TR_r)$ 인 최적경로 선택

2), 3) 단계에서 산출된 TR_r 와 TD_r 의 합이 최소가 되는 경로 r이 최적경로가 된다. 또한 목적차량이

목적지까지 도달하는데 걸리는 최적경로시간은 $\min(TD_r + TR_r)$ 값이다.

4. 결론

본 논문에서는 PRT시스템 도입을 위하여 실제 상황에서 동기화 운행제어방식일 경우의 최적경로탐색 방안을 연구하였다. 출발지/목적지 간의 물리적 시공간 거리값인 TR_r 을 산출하고, 해당 경로로 차량투입이 가능한 시점인 TD_r 을 산출하여 $\min(TD_r + TR_r)$ 인 경로를 최적경로로 결정하는 알고리즘을 제시하였다. PRT시스템 내에 차량 운영 수나 네트워크 복잡도와 같은 환경을 고려하여 국내 도입시 효율적 운영에 기여할 것으로 기대된다.

향후 연구로는 비동기화 방식의 PRT시스템에서의 최단경로설정에 관한 연구와 동기화 방식 및 비동기화 방식 비교분석이 필요하다. 또한 미래시점의 수요와 트래픽을 고려한 최적경로 산출 방안에 관한 연구가 필요하다.

참고문헌

1. 강맹규, 「네트워크와 알고리즘」, 박영사, 1995.
2. 팍재혁, “로봇 시스템의 응용을 위한 다목적 경로 설정 방법”, 한양대학교 대학원 박사학위 논문, 2006.
3. 남광희, 김성영, “PRT(Personal Rapid Transit) System”, 신교통, 2007 봄, pp.53-60, 2007.
4. 이준호, 정락교, “Personal Rapid Transit 시스템의 특성 및 국내외 개발 현황”, 대한전기학회 추계학술대회논문집, 2009.
5. 이준호, 정락교, 김용규, “차상용 임베디드 제어보드를 이용한 PRT 차량 운행제어 알고리즘 시험을 위한 플랫폼 설계”, 전기학회논문지, 58권, 10호, pp.1962-1967, 2009.
6. 이진선, 김경태, “소형궤도차량의 국내 적용시 정책적 검토 사항 연구”, 한국철도학회논문집, 12권, 4호, pp.526-534, 2009.
7. 한국철도기술연구원, 「소형궤도열차시스템의 적용성 검토 연구」, 건설교통부, 한국건설교통기술평가원, 2006.