

다중 무인 전기차량의 자율주행을 위한 선도-추종 알고리즘에 관한 연구

박신배*, 하정웅*, 박종규*
*창원대학교 첨단방위공학대학원
e-mail:psb7006@changwon.ac.kr

A Study on the Leader-Follower Algorithm for Autonomous Navigation of Multiple Unmanned Electric Vehicles

Shin-Bea Park*, Jeong-Ung Ha*, Jong-Kyo Park*
*Advanced Defense Engineering, Changwon National University

요 약

This paper presents the leader-follower(LF) formation algorithm of real-time autonomous navigation system for multiple unmanned electric vehicles using dynamic programming(Dijkstra's algorithm) in order to find the shortest path. The LF using Gipps' car-following model is based on relative distance behavior of the other unmanned electric vehicles by implicitly assuming that the their vehicles make a similar collision avoidance reasoning in which each unmanned electric vehicle navigates dependently with implicit communications with other vehicles. It's application is shown through simulations that the proposed algorithm are simulated for the multiple electric vehicles in real-time dynamic environment.

1. 서론

최근에 자연 생태계의 특성을 군사적으로 활용하기 위한 연구가 진행되고 있다. 무인기, 무인차량, 무인수상정, 무인잠수정 등을 동종 또는 이종으로 운용하는 다중무인체에 대한 관심이 높아지면서, 새 무리의 행동, 물고기 떼의 행동, 곤충의 무리 행동, 동물의 집단행동과 같이 유사한 생태계 행동 패턴을 군사적으로 활용하는 방안이 대두되고 있다. 그중에서 가장 주목받는 것이 다중 무인로봇(또는 다중무인체)이다. 이것은 하나의 로봇이 할 수 없는 임무를 다수의 로봇이 협동하여 복잡한 임무를 수행하는 것이 가능하기 때문이다. 군사과학기술의 발전에 따라 다양한 종류의 첨단화된 로봇들이 등장하고 있으며, 이를 활용한 다중무인로봇은 미래 전쟁 양상에서 중요한 역할을 할 것으로 예상된다.

최근에는 지상에서 각자 운용하는 지상 무인차량들을 통합하여 다중으로 운용하여 전투효율을 극대화하는 방향으로 발전하고 있으며, 저비용으로 전력화가 가능한 다중 지상무인체계 들의 활용도는 점점 높아질 것으로 예상된다. 이러한 다중무인체계를 통합하여 임무를 수행하기 위해서 다양한 분야의 첨단 과학기술이 필요하다. 미국과 이스라엘은 다중 지상무인체계 개발을 선도하고 있으며, 공중, 지상, 해상 등 모든 영역에서 다양한 다중 형태로 운용하기 위한 첨단 무인체계를 개발하고 있다. 최근에는 중국도 다중 무인체계에 대한 집중적인 연구개발 투자로 그 연구결과가 가시적으로 나타나고 있다.

특히, 다중 지상무인차량(UGV)의 장점은 UGV를 더 넓은 범위의 임무에 적용하고, 운영자 임무 작업량을 줄이며, 통신 자원을 보다 효율적으로 사용하는 것이다. 많은 단일 UGV 임무는 임무작업 부하를 분할하는 더 큰 무인차량 그룹으로 더 빠르게 수행할 수 있다. 그러나 특정 임무는 다중 UGV에서만 가능하거나 무인차량 간의 협력으로 크게 향상된다.

무인차량의 동력원으로 내연 기관을 대체하기 위한 다양한 전력 장치에 대한 투자가 증가되고 있으며, 특히 미래 무인차량으로서 전기차량에 대한 관심이 집중되고 있다. 본 연구에서는 무인전기차량을 수학적 모델링을 수행하였다.

일부 주둔지 위치에서 어떤 목적지 위치로 이동하기 위해 격자와 같은 도심의 네트워크를 따라 이동하는 다중 무인차량이 있는 도시 환경이 고려될 수 있다. 네트워크화된 도로에서 최단거리로 이동하는 것이 중요하다. 이러한 무인차량은 교통법규를 준수하도록 제한되어 있다. 즉, 속도는 제한 속도에 의해 제한되며 교차로를 통해서만 이동할 수 있다. 또한, 각 교차로에는 무인차량이 통과할 때와 무엇을 기록하는지 기록하는 무선 센서 네트워크가 있다고 가정한다.

본연구에서는 3대 무인 전기차량의 자율주행 시스템을 검토하고 다중 무인차량을 자율주행하기 위한 주요기능을 모의하고 이 자율주행시스템이 무인 이동, 정찰 및 감시, 전술 통신, 임무 계획 및 모니터링을 할 수 있도록 구현하기 위한 선행연구를 수행한다. 본 모델에서 모델링한 3대의 무인차량은 독립적으로 또는 팀으로 작동할 수 있으며 단일 운용자가 제어 및 모니터링한다. 무인전기차량에 대한 수학적 모델링과 자율주행을 위한 경로계획을 적용하여 자율운행 알고리즘을 구현하고 시뮬레이션을 통해

알고리즘의 타당성을 검증한다.

2. 다중 무인전기차량의 선도-추종 알고리즘

2.1 무인 전기차량의 수학적 모델링

다중으로 구성된 무인전기차량의 i 에 대한 운동방정식은 $i = 1, 2, \dots, N$ 으로 나타내고, 여기서, N 은 차량의 수이다. 일반적인 종방향 동역학 모델에 의해 제어된다고 가정하면 다음과 같은 동역학 방정식을 얻는다.

$$\begin{cases} \dot{p} = v_i \\ m_i \dot{v}_i = F_{mot,i} - C_2 - C_3 v_i^2 - m_i g \sin(\alpha_i) \end{cases} \quad (1)$$

여기서, m_i 각각 무인 전기차량의 질량, α_i 는 각각 무인전기차량의 도로 경사, g 는 중력가속도, $F_{mot,i}$ 는 각각 무인전기차량의 전기모터에 의해 생성된 추진력 또는 제동력을 나타내며 C_2, C_3 는 식별해야 하는 매개변수이다.

구동 토크는 전기자 전류 I_a 에 비례하는 것으로 가정하며, 고정 기어 배열로 인해 바퀴에서 모터에 의해 생성된 추진력에 대해서도 마찬가지이다.

$$F_{mot,i} = C_1 I_{a,i} \quad (2)$$

배터리 전류 I_{bi} 는 다음과 같이 정의된다.

$$I_{b,i} = C_4 I_{a,i} \quad (3)$$

여기서, C_4 는 변환율이다. 순 전기화학적 전력, 즉 배터리 충전 또는 방전에 해당하는 실제 전력은 다음과 같이 주어진다.

$$P_{b,i} = I_{b,i} E \quad (4)$$

여기서 전압원 E 는 일정하다고 가정한다. 다중 무인전기차량의 속도와 위치를 다음과 같이 정의한다.

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_{1,i} \\ \dot{x}_{2,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{p}_i \\ v_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

그런 다음, 방정식(1)-(3)을 다음과 같은 상태 공간 식으로 쓸 수 있다.

$$\begin{cases} \dot{x}_{1,i} = x_{2,i} \\ \dot{x}_{2,i} = -\frac{C_3}{m_i} x_{2,i}^2 + \frac{C_1}{m_i} I_{b,i} - \frac{C_2}{m_i} - g \sin(\alpha_i) \end{cases} \quad (6)$$

실제 입력은 모터토크이고 설계는 전류를 제어하는 것임을 언급할 가치가 있다.

일단 배터리 전류 I_b 가 있으면, 모터토크는 다음 방정식을 사용하여 계산할 수 있다.

$$T_{mot,i} = \frac{C_1}{C_4} I_{b,i} r_w \quad (7)$$

여기서, r_w 는 휠의 반경이다.

2.2 경로계획

여기서 지도(맵)을 나타내 그래프 $g(\nu, \mathcal{E})$ 를 사용하여

정점 집합의 요소 $\nu = \{\nu_1, \dots, \nu_N\}$ 는 무인전기차량이 주행할 때 통과할 수 있는 교차로를 나타내며, 모서리 세트의 요소는 서로 다른 두 교차로 사이의 도로 구간을 나타낸다.

일반성을 잃지 않고 ν_1 과 ν_N 을 사용하여 출발지(1번)와 목적지(8번)를 각각 나타낸다. 간선도로의 집합 $\mathcal{E}$ 에 속하는 순서쌍 (ν_i, ν_j) 은 무인 전기차량이 교차로 ν_i 에서 교차로 ν_j 로 이동할 수 있다는 것은 의미한다. 어떤 $\nu_i \in \nu / \{\nu_1, \nu_N\}$ 에 대해 항상 ν_1 로 시작하여 ν_i 로 끝나는 일련의 모서리와 ν_i 로 시작해서 ν_N 으로 끝나는 일련의 모서리를 찾을 수 있다.

모든 $\nu_i \in \nu / \{\nu_1, \nu_N\}$ 에 대해 다음을 수행할 수 있다. 즉, 우리의 모델링에는 출발지 또는 목적지에 도달할 수

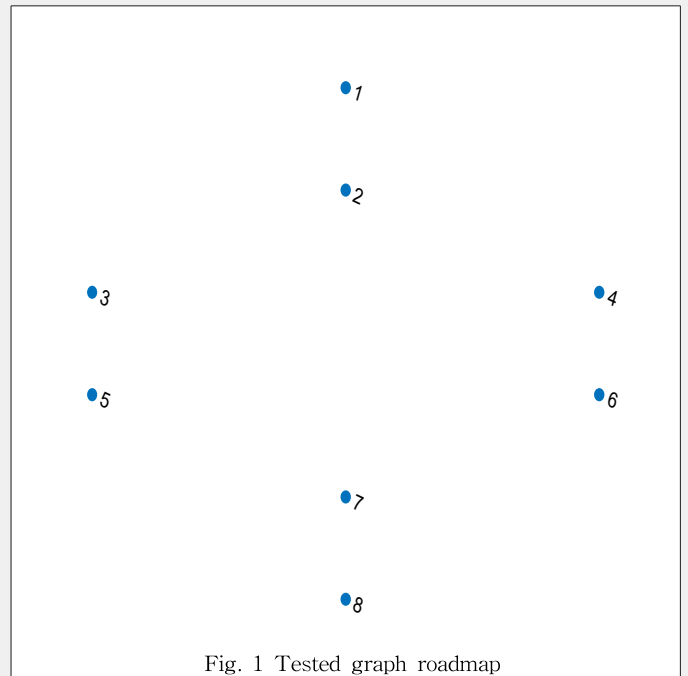


Fig. 1 Tested graph roadmap

여기서 최대 속도 제한과 주행거리 (ν_i, ν_j) 를 나타내기 위해 각각 $\bar{v}_{ij}$ 와 l_{ij} 를 사용한다. 문제를 단순화하기 위해 다중 무인 전기차량이 세그먼트 도로에서 주행할 때 최대 속도 $\bar{v}_{ij}$ 를 유지하고 $\dot{x}_{2,i} = 0$ 각 세그먼트 도로의 경사는 α_{ij} 라고 가정한다. 따라서 각 세그먼트 도로를 주행하는데 필요한 에너지는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$w_{ij} = E l_{ij} t_{ij} \quad (8)$$

여기서,

$$t_{ij} = \frac{l_{ij}}{\bar{v}_{ij}}, \quad I_{ij} = \frac{C_3 C_4}{C_1} \bar{v}_{ij}^2 + \frac{C_2 C_4}{C_1} + C_4 g \sin(\alpha_{ij}).$$

동적 프로그래밍 방법에서 w_{ij} 는 주행길이 (ν_i, ν_j) 의 보상으로 간주하여 Matlab 함수를 사용하여 계산할 수 있다.

동적 프로그래밍은 일명 Dijkstra 알고리즘으로 완전히

연결된 그래프에서 에지(길이) 최단경로 비용을 이용하여 최단경로를 찾는 것이다. 동적 프로그래밍의 접근 방식은 문제를 더 간단한 하위 문제로 재귀적으로 분할하는 것을 기반으로 모델링하여 계산할 수 있다. 또한, Dijkstra의 알고리즘은 균일하므로 대상 노드를 미리 알 필요가 없고 휴리스틱 정보를 사용하지 않는다.

2.3 Gipps 자동차 추종모델

Gipps의 자동차 추종 모델은 "안전거리" 또는 "충돌 회피" 모델의 등급에 관한 가장 일반적으로 사용되는 모델이다⁵⁾. 이 등급의 모델은 안전한 추종 거리를 지정하는 것을 목표로 한다. 항상 안전거리를 유지하기 위해 운전자의 행동을 조정한다. 모델의 기본 아이디어는 각 운전자가 자신의 미래속도 또는 다음 순간(즉, 지연 τ 후) 동안 그의 속도를 계획하거나 앞차가 급정거하는 경우에도 안전하게 정지할 수 있도록 한다. 운전자가 앞 차량이 없는 경우, 시간($t + \tau$)에 대한 계획된 속도는 두 가지 조건을 결합한 경험적 바탕의 부등식으로부터 얻는다. 즉, (a) 속도가 운전자의 원하는 속도를 초과하지 않아야 하고, (b) 가속도는 원하는 속도에 도달했을 때 0이 될 때까지 속도가 증가함에 따라 감소되어야 한다.

Gipps의 모델에 따르면 차량이 도달하는 속도는 다음과 같다.

주어진 시간 순간 ($t + \tau$)에서 (여기서 τ 는 지연시간) "명백한" 운전자의 반응 시간 (1)]은 다음과 같이 주어진다.

$$\dot{s}_f(t+\tau) = \min\{\dot{s}_{f,acc}(t+\tau), \dot{s}_{f,dec}(t+\tau)\} \quad (10)$$

여기서,

$$\dot{s}_{f,acc}(t+\tau) = \dot{s}_f(t) + 2.5\ddot{S}_f\tau\left(1 - \frac{\dot{s}_f(t)}{\dot{S}_f}\right)\sqrt{0.025 + \frac{\dot{s}_f(t)}{\dot{S}_f}} \quad (11)$$

$$\dot{s}_{f,dec}(t+\tau) = b_f\tau + \frac{b_f^2\tau + \left[2(s_i(t) - s_f(t) - (L_i + \Delta S^0))\right]}{\sqrt{\left[-\dot{s}_f(t)\tau - \frac{\dot{s}_i^2(t)}{\hat{b}}\right]}} \quad (12)$$

여기서,

l, f = 각각 선도, 추종 첨자

s = 차량 주행공간

$\dot{s}$ = 차량 속도

$\dot{S}_f, \ddot{S}_f$ = 추종차량의 최대 원하는 속도 및 가속도

$b_f, \hat{b}$ = 각각, 뒤따르는 차량의 가장 심한 제동 및 리더의 가장 심각한 제동 능력에 대한 그의 추정

L = 선도 차량 길이

ΔS^0 = 정차 시 차간 간격

실제로 운전자는 두 가지 중 최소 속도를 선택한다. 가능한 대안, 여기서 첫 번째 ($\dot{s}_{f,acc}$)는 원하는 속도에 도달하려는 운전자의 의지를 고려하는 반면, 두 번째

($\dot{s}_{f,dec}$)는 선도 차량 뒤에서 안전한 거리를 유지하는 것을 목표로 한다.

모델 유도에서 Gipps는 추가 항 θ 를 고려했다. 모델의 제동(브레이크) 구성 요소에서 추가적인 편안함 지연모델의 해석적 유도에서 추종차량은 항상 원하는 최대 속도로 제동하지 않도록 하였다. Gipps는 그런 다음 θ 가 $\tau/2$ 와 같다고 가정하고, 이러한 이유로 방정식 (11) 및 (12)에 나타내지 않았다. 사실, Gipps는 $\theta = \tau/2$ 및 $b_f > \hat{b}$ 즉, 심한 제동을 하는 선행 운전자의 의지는 과소 평가되지 않았다. 안전한 속도로 이동하는 차량은 안전한 속도와 거리를 무한대로 유지할 수 있다. 실제로, 제동 속도 b_f 및 $\hat{b}$ 의 상대적 크기는 모델 안정성의 기초가 된다. 참고 문헌 5)에서 보여주듯이, $b_f > \hat{b}$ 은 모델의 선행 안정성을 위한 충분조건이다.

2.4 시뮬레이션 결과

본 연구에서는 교차로가 있는 도심도로에서 3대의 무인 전기 차량이 일정한 상대거리 간격을 유지하면서 최단경로로 자율주행할 때 선도-추종 대형을 유지하는 것을 시뮬레이션하였다. 그 결과를 Fig. 2와 Fig. 3에서 나타내었다. Fig. 2는 선도 차량의 위치와 속도를 보여주고 있다. 이 그림에서 선도 차량이 목적지에 도달하기 전에 3개의 교차로를 통과하는 것을 볼 수 있다. 두 개의 서로 다른 교차점 사이의 각 세그먼트 도로에서 해당 속도는 도로의 최대 허용 속도를 추종한다. Fig. 3은 선도차량과 각 추종 차량의 상대거리 간격과 속도차이를 보여준다. 이 그림에서 본 바와 같이 무인전기 차량은 일정한 대형을 이루고 차량은 안전한 차량 간 거리와 동일한 속도를 유지하고 있음을 볼 수 있다.

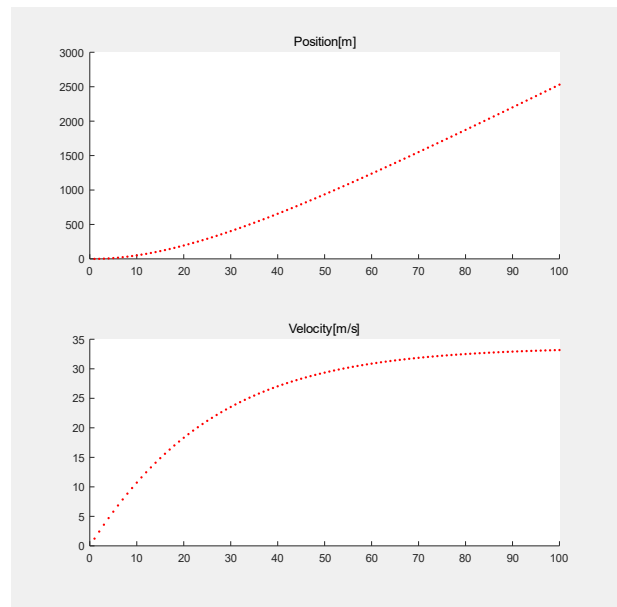


Fig. 2 Position and velocity of leader

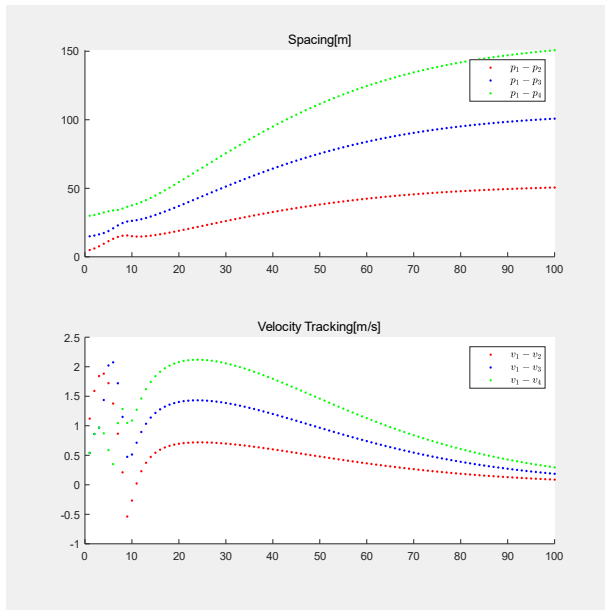


Fig. 3 Relative distance and velocity between leader and follower

3. 결론

본 논문에서는 다중 무인 전기차량이 교차로가 있는 도심의 도로에서 자율주행하는 알고리즘을 구현하고, 그 알고리즘의 타당성을 검증하기 위해 모의 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 사용되는 3개의 다중 무인전기차량이 상호 충돌하지 않고 일정한 간격을 유지하면서 주행할 수 있음을 확인할 수 있었다.

후기

본 연구는 방위사업청/국방품질기술연구원의 지원으로 국립창원대학교 첨단방산소재부품연구실에서 수행한 “다중무인체의 자율주행을 위한 최적 경로계획 알고리즘 연구” 선도형 과제의 일부 결과이다.

참고문헌

- [1] Park Shin Bae, “A Study on the Intelligent Autonomous Navigation Algorithm for Complex Obstacles Collision Avoidance of Swarm Unmanned Moving Vehicles”, 2020 Proceedings of the Annual Autumn Conference, KIMST, DaeJeon(DCC), 7-8 November, pp.1544-1545
- [2] Park Shin Bae, A Study on the Intelligent Collision Avoidance Algorithm of Autonomous Navigation System for Swarm Unmanned Surface Vehicle, Military Science and Technology, 2019 Annual Autumn Conference at Deajeon, 2019, pp.300-301.

- [3] 박신배, 무인함정의 자율운항을 위한 최적경로계획 및 지능형 장애물 충돌회피 알고리즘 연구, 2020 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 : 해양무기체계부분, DaeJeon(DCC), 7-8 November, 2020, pp.3-7.
- [4] 박신배 외, 군집 해양무인로봇의 자율운항을 위한 3차원 장애물 충돌회피 알고리즘 연구, 한국해군과학기술학회 2019 추계학술대회 논문집, Navy Hotel(Seoul), 4-6 December, 2019, pp.1-4.
- [5] 1. Gipps, P. G. A Behavioural Car-Following Model for Computer Simulation. Transportation Research Part B, Vol. 15, No. 2, 1981, pp. 105 - 111