

네트워크 기반 자율 이동 로봇을 위한 시간지연 보상을 통한 새로운 동적 장애물 회피 알고리즘 개발

김동선*, 오세권*, 김대원**
명지대학교* **

Development of a New Moving Obstacle Avoidance Algorithm using a Delay-Time Compensation for a Network-based Autonomous Mobile Robot

Dong-Sun Kim*, Se-Kwon Oh*, Dae Won Kim**
MyongJi Univ* **

Abstract - A development of a new moving obstacle avoidance algorithm using a delay-time Compensation for a network-based autonomous mobile robot is proposed in this paper. The moving obstacle avoidance algorithm is based on a Kalman filter through moving obstacle estimation and a Bezier curve for path generation. And, the network-based mobile robot, that is a unified system composed of distributed environmental sensors, mobile actuators, and controller, is compensated by a network delay compensation algorithm for degradation performance by network delay. The network delay compensation method by a sensor fusion using the Kalman filter is proposed for the localization of the robot to compensate both the delay of readings of an odometry and the delay of reading of environmental sensors. Through some simulation tests, the performance enhancement of the proposed algorithm in the viewpoint of efficient path generation and accurate goal point is shown here.

1. 서 론

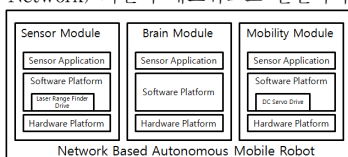
제어 시스템의 구조가 복잡해지고 다양해지면서 중앙집중형 제어시스템은 많은 양의 데이터 처리 요구에 부합하지 못하는 문제점으로 인하여 네트워크 기반 시스템으로 대체되고 있는 추세이다. 이러한 네트워크 기반 시스템은 자율 이동 로봇과 같은 복잡한 시스템으로도 연구 분야가 확대 되고 있는 실정이다[1]. 이동 로봇이 자율 주행을 함에 있어서 충돌회피 제어 알고리즘은 목적지까지 최적의 경로를 설정하고 고정 장애물 또는 동적장애물을 회피 하도록 해야 한다. 이러한 충돌회피 제어 알고리즘은 크게 경로계획(Path Planning)과 장애물회피(Collision Avoidance) 등으로 나눌 수 있다. 그러나 기존에 연구된 동적장애물 회피 알고리즘 중에서 네트워크 기반 시스템에 적용하여 시간 지연을 고려한 동적 장애물 회피 알고리즘은 전무한 실정이며, 적용 되는 경우 성능 저하 문제는 필연적이라고 판단된다[5].

따라서 본 논문에서는 네트워크 기반 자율 이동 로봇의 동적 장애물 회피 알고리즘을 위한 네트워크 지연에 의한 성능 저하의 보상을 위한 제어 방법을 제안한다. 네트워크 기반 시스템의 경우 네트워크 지연에 의한 제어 성능 저하의 보상 전략은 명확히 정의되어야 한다. 시간의 변화에 따른 네트워크 지연에 강인한 제어기의 설계가 필수적이며 본 논문에서 제안한 방법이 그 보상 방법의 하나이다. 동적 장애물 회피 알고리즘은 이동 로봇의 위치 판단이 중요하다. 그러나 네트워크 기반 로봇에서는 네트워크 지연 때문에 위치 판단이 부정확해진다. 이 부정확성은 주행거리계 만을 사용한 위치판단만 아니라 환경 센서를 융합한 위치판단에서도 나타난다. 그리고 센서 융합에 있어 센서 정보를 취득하는 시점이 지연되어 센서 융합이 수행된다. 본 논문에서 위치 판단은 환경 센서 정보를 사용한 확률적 위치 판단과 주행 거리계만을 사용한 위치판단을 조합하는 센서융합을 통해 위치 판단이 수행 된다. 센서융합은 위치 판단과정에서의 융합시점에 포함된 지연을 고려하여 칼만 필터를 사용한 센서융합이 수행된다.

2. 본 론

2.1 네트워크 기반 자율이동로봇 시스템의 구성

그림 1은 본 논문의 대상인 네트워크 기반 자율 이동 로봇 소프트웨어 구성도이다. 모듈간의 통신은 이더넷 (Ethernet)이나 CAN (Controller Area Network) 기반의 네트워크로 연결되어 있다.



〈그림 1〉 네트워크 기반 자율 이동 로봇 소프트웨어 구성도

이동 로봇의 분산화 정도는 낮은 분산화 임도를 갖는 시스템보다 높은 분산화 시스템을 가져 유연한 시스템이 가능한 시스템을 목표로 한다. 그러나 높은 분해능을 가지는 네트워크 시스템은 네트워크 지연이라는 문제가 발생 하게 된다. 이는 네트워크 지연이 이동로봇의 제어 성능에 영향을 주는 문제가 있다. 일반적인 네트워크 기반의 시스템은 각 모듈에서 다중 태스크가 실행되는 형태를 가진다. 이러한 멀티태스킹이 가능한 환경에서 본래의 네트워크 지연과 결합하여 비동기적인 단위 시간 지연이 발생한다[7].

2.2 장애물 모델링

이동로봇에 장착되어진 LRF (Laser Range Finder)를 이용하여 실시간성이 보장된 가운데 주변 정보를 획득하고 주어진 정보 가운데 장애물을 검출한다. 검출 방법은 식(1) 과 같이 나타낼 수 있다[2].

$$D(r_i, r_{i+1}) = \sqrt{r_{i+1}^2 + r_i^2 - 2r_{i+1}r_i \cos \Delta \alpha} \quad (1)$$

여기서 r 은 LRF에서 측정된 거리 정보를 나타내며 아래첨자 i 는 N 번째 측정 포인트($i=1, \dots, N$) 을 의미하고 α 는 LRF의 Angular Resolution을 의미한다. 장애물을 인식 하기 위해선 식(1)에서 얻어진 값을 통해 장애물 정보를 추출해야 한다. 조각화 과정은 두 점 사이의 거리가 가변 임계값 (D_{th})과 비교하여 작거나 같으면 같은 조각으로, 크면 다른 조각으로 분류하게 된다. 가변 임계값(D_{th})은 식(2)와 같다[2].

$$D_{th} = C_0 + \frac{C_1 \min(r_i, r_{i+1})}{\cot(\beta) \left(\cos\left(\frac{\Delta \alpha}{2}\right) - \sin\left(\frac{\Delta \alpha}{2}\right) \right)} \quad (2)$$

$$r_{i,i+1} \approx |r_i - r_{i-1}|$$

$$C_1 = \sqrt{2(1 - \cos \Delta \alpha)}$$

$$C_0 = \text{constant parameter}$$

2.2.1 동적 장애물 위치 예측

조각화 과정을 통해 구해진 장애물 정보와 센싱 과정에서 발생하게 되는 각종 노이즈 정보를 종합하여 장애물의 정확한 위치를 추정한다. 또한 동적 장애물의 경우 앞으로 경로를 예상 할 수 있는 정보가 된다. 칼만 필터[3] 통해 동적장애물의 위치를 예측 하고 충돌 위치를 추정 할 수 있도록 한다[3]. 본 논문에서 장애물의 절대좌표 (x, y)에 대하여 따로 예측하였고, 장애물은 직선운동을 한다고 가정하였다. 동적장애물을 위한 칼만 필터는 식(3)을 기본으로 하며, 로봇 기구학 모델을 사용한 예측 모델의 표현은 식 (4)와 같다.

$$\text{Project the state ahead} \quad (3)$$

$$\hat{X}_k^- = A\hat{X}_{k-1} + BU_k$$

$$\text{Project the error covariance ahead}$$

$$P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q$$

$$\text{Compute the Kalman gain}$$

$$K_k = P_k^- H^T (HP_k^- H^T + R)^{-1}$$

$$\text{Update estimate with measurement } Z_k$$

$$\hat{X}_k = \hat{X}_k^- + K_k(Z_k - H\hat{X}_k^-)$$

$$\text{Update the error covariance}$$

$$P_k = (I - K_k H) P_k^-$$

$$x \text{ 축 상태 벡터 } X = \begin{bmatrix} x \\ \theta \end{bmatrix}, y \text{ 축 상태 벡터 } Y = \begin{bmatrix} y \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\hat{X}_k^- = \hat{X}_{k-1}^- + \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{k-1} - x_k \\ \Delta t \\ \theta_{k-1} - \theta_k \\ \Delta t \end{bmatrix}$$

$$\hat{Y}_k^- = \hat{Y}_{k-1}^- + \begin{bmatrix} \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{k-1} - y_k \\ \Delta t \\ \theta_{k-1} - \theta_k \\ \Delta t \end{bmatrix}$$

2.3 동적 장애물 회피 알고리즘

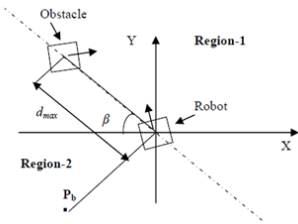
동적장애물 회피의 핵심은 실시간으로 장애물을 회피하는 것으로, 이를 위해서는 빠른 연산이 가능한 간단한 알고리즘이 더 효율적이다. 본 절에서는 앞 절에서 구해진 정보를 이용하여 현재 로봇에서 동적 장애물의 경로를 파악하고 이를 Bezier 곡선을 이용하여 경로를 생성 장애물을 회피하는 방법을 제안 한다[4]. Bezier 곡선은 식(5) 같이 표현한다.

$$P(u) = \sum_{i=0}^n C_i u^i (1-u)^{n-i} P_i \quad (0 \leq u \leq 1) \quad (5)$$

$${}_n C_i = \frac{n!}{i!(n-i)!}$$

여기서 P_i 는 Bezier 곡선을 생성하기 위해 만든 제어 지점이다. 식(4)에서 u 는 0과 1사이의 값인데 작을수록 더욱 세밀한 간격의 곡선을 얻을 수 있다.

회피 방법은 그림(2)에 나타나 있다. 이동 로봇에서 동적 장애물을 감지한 거리가 d_{max} 이면 이동 로봇은 동적 장애물의 이동방향과 수직인 P_b 방향으로 d_{max} 만큼의 길이로 회피경로를 생성한다.

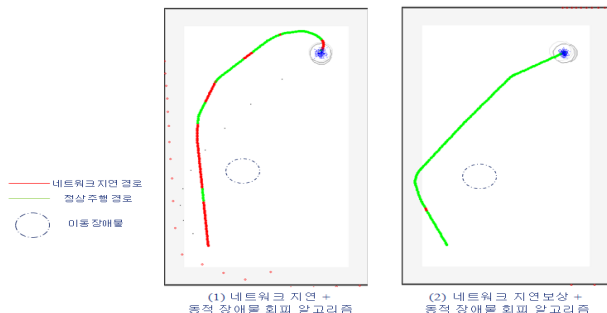


〈그림 2〉 동적 장애물에 대한 회피 방향

2.4 위치 판단을 위한 네트워크 지연 보상

자율 이동 로봇의 정확한 위치 판단은 목적지점까지 정확한 이동을 위해 필수적인 기능이다. 그러나 네트워크 기반 자율 이동로봇의 경우 네트워크를 통해 주어진 센서 정보와 주행 거리계 정보는 실제 편차를 갖게 되어 부정확한 정보를 가지고 주행하여 예상치 못한 지점으로 이동하는 결과를 보일 수 있다. 이러한 위치 판단의 오차를 보상하기 위해 센서융합 기법을 사용 한다. 먼저 보다 정확한 로봇의 위치판단과 네트워크 지연 보상을 위해 네트워크 기반 로봇에서의 네트워크 지연을 위한 칼만 필터 알고리즘을 제안한다[5]. 위치 판단 알고리즘은 환경 센서 정보와 지도 정보를 사용하는 파티클 필터(Particle Filter)를 사용하여 맵 매칭을 하고, 이를 통해 자신의 위치를 확률적으로 판단하는 알고리즘인 MCL(Monte Carlo Localization)을 사용한다. 기존의 MCL 알고리즘에서 허프 변환(Hough Transform)[6]을 통해 로봇이 움직이고 센서 정보를 취득 할 때 사후적 분포(Posterior Distribution)가 계산된다. 위에서 언급한 칼만 필터 관찰 모델은 브레인 모델에서 연산이 수행되지만 연산 과정에서 사용되는 예측 모델은 모델리티 모듈에서 연산 수행된 결과를 이용하고, 환경 센서 정보 역시 센서 모듈에서의 과거 시점의 지연된 정보로 연산이 처리 되므로, 각 과정에서 네트워크 지연이 포함된다. 그러나 관찰 모델의 연산 과정에서의 예측 모델은 확률 적인 지역 트래킹 용도로 사용되기 때문에 로봇의 주행에서 보면 로봇의 위치 판단 결과에 영향을 거의 주지 않는다. 그러므로 환경 센서의 정보만을 보상한다[5].

네트워크 기반 자율이동 로봇의 네트워크 지연 보상이 되어진 알고리즘과 보상이 없는 알고리즘의 성능실험을 동일한조건 을 가지는 가상환경에서 실험 하였다.



〈그림 3〉 4.5km/h 속도 장애물 회피 경로 비교

그림3에 (1)은 네트워크 지연 보상이 없는 경우의 모델을 이용하여 동적 장애물 회피 알고리즘을 구동한 예이며 (2)는 네트워크 지연 보상 알고리즘

을 적용하여 동적 장애물 회피 알고리즘을 적용한 예이다.

〈표 1〉 지연보상 제어 실험을 위한 전송 메시지의 정의

네트워크 메시지의 구분	전송 주기	메시지의 크기
환경 센서 정보	90ms	370 Bytes
주행거리계 센서 정보	95ms	22 Bytes
액츄에이터 구동 명령	100ms	22 Bytes
더미 태스크 1	120ms	16 Bytes
더미 태스크 2	140ms	16 Bytes
더미 태스크 3	160ms	16 Bytes

표(1)은 지연보상 제어 실험을 위한 네트워크 전송 메시지 정의이다. 네트워크 지연 모델은 CAN 통신 프로토콜을 모델링하였다.

2.5 실험결과

실험환경은 동적 장애물의 속도는 동일하고 가상환경의 크기는 가로 4m 세로6m에서 실시하였다. 실험 평가는 이동경로의 효율성 평가와 목적 지점까지 도달하는 주행 시간을 비교 하였다.

〈표 2〉 4.5km/h 속도 동적장애물 회피 경로 평가

알고리즘	(1)의 경우	(2)의 경우
성능		
이동 경로 효율(p)	0.15	0.1
경로 길이(l')	11m	11m
주행 시간(t')	32.323s	23.411s
평균 속도(v')	0.340m/s (1.224km/h)	0.469m/s (1.6884km/h)

이동 경로 효율성 평가는 식 (6) 과같이 표현 되고 l 은 Bezier 곡선을 통해 생성된 경로의 길이를 d_p 는 생성된 경로와 실제 경로와의 편차의 평균을 나타낸다. 효율 평가 값이 작을수록 동적 장애물회피 생성 경로에 근접하게 이동로봇이 이동한 것을 의미한다.

$$s = \left(\sum d_p \right) / l \quad (6)$$

최종적으로 제안된 정량적 평가를 통해 제안된 보상 방식을 사용했을 때 와 그렇지 않은 경우보다 속도와 이동경로 효율성에서 앞서는 것을 입증하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 네트워크 기반 이동로봇에서 단순패턴의 동적장애물이 존재하는 경우, 시간지연 보상을 통해 장애물 회피시 시간지연 문제가 발생시키는 문제를 해결하는 알고리즘은 제안하였다. 또한 실험을 통해 그 알고리즘의 효율성을 입증하였다. 향후 과제로는, 위성을 통한 원거리 제어에서 발생할 수 있는 네트워크 지연을 보상하는 알고리즘 개발과, 네트워크 기반 이동 로봇의 자율 주행에 있어 동적 장애물과 고정 장애물이 공존하는 환경에서 네트워크 지연 보상을 통해 알고리즘 성능을 향상 시키는 연구를 진행 할 예정이다.

[참고문헌]

- [1]T.Yoshimi, N.Matsuhira, K.Suzuki, D.Yamamoto, F.Ozaki, J.Hirokawa, and H.Ogawa, "Development of a Concept Model of a Robotic Information Home Appliance, ApriAlpha", Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot Systems, pp.205-211,2004.
- [2]K. Rebai, A. Benabderrahmane, O. Azouaoui and N. ouadah, "Moving Obstacles Detection and Tracking with Laser Range Finder", ICRA2009 International Conference on Advanced Robotics, pp.1-6, 2009.
- [3]Wonsang Joung, Youngkiu Choi and Sanghyuk Lee, "Prediction and Avoidance of the Moving Obstacles Using the Kalman Filters and Fuzzy Algorithm", 대한전기학회 전기학회논문지 학술지널, pp.307-314, 2005.
- [4]E.-H. Guechi, J.Lauber, and M.Dambrine, "On-line Moving-Obstacle Avoidance using Piecewise Bezier Curves with Unknown Obstacle Trajectory", Mediterranean Conference on Control and Automation, pp.505-510, 2008.
- [5]Hongryeol Kim, Joomin Kim, and Daewon Kim, "Development of Coordinated Scheduling Strategy with Network Response Time Analysis for The CAN-Based Distributed Control Systems", Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot Systems, pp.2099-2104, 2004.
- [6]Dongheui Lee, Woojin Chung and Munsang Kim, "A Reliable Position Estimation Method of the Service Robot by Map Matching Algorithm", ICRA'03.IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.2830-3835, 2003