

네트워크 기반 자율이동 로봇을 위한 시간지연 보상을 통한 장애물 회피 알고리즘의 성능 개선

김주민*, 김진우**, 김대원***

명지대학교*, (주)와이즈오토모티브**, 명지대학교***

Performance Enhancement of an Obstacle Avoidance Algorithm using a Network Delay Compensation for a Network-based Autonomous Mobile Robot

Joo-Min Kim*, Jin-Woo Kim**, Dae-Won Kim***

MyongJi University*, Wise-Automotive**, MyongJi University***

Abstract - In this paper, we propose an obstacle avoidance algorithm for a network-based autonomous mobile robot. The obstacle avoidance algorithm is based on the VFH (Vector Field Histogram) algorithm and delay-compensative methods with the VFH algorithm are proposed for the network-based robot that is a unified system composed of distributed environmental sensors, mobile actuators, and the VFH controller. Firstly, the compensated readings of the sensors are used for building the polar histogram of the VFH algorithm. Secondly, a sensory fusion using the Kalman filter is proposed for the localization of the robot to compensate both the delay of the readings of an odometry sensor and the delay of the readings of the environmental sensors. The performance enhancements of the proposed obstacle avoidance algorithm from the viewpoint of efficient path generation and accurate goal positioning are also shown in this paper through some simulation experiments by the Marilou Robotics Studio Simulator.

1. 서 론

이중 플랫폼간의 명확한 시스템 결합뿐만 아니라 가격최소화, 유연성, 확장성의 장점을 가지는 네트워크 기반 시스템은 자율 이동 로봇 같이 복잡한 시스템으로도 확대되고 있다[1, 2]. 이러한 네트워크 기반 시스템에 있어서 전송지연의 문제는 성능저하의 주요원인이며 특히 자율이동 로봇에 적용시 신뢰성을 보장할 수 없는 요인이 되고 있다. 본 논문에서는 네트워크 기반 자율 이동로봇을 대상으로 시간 변화에 따른 네트워크 지연에 강인한 제어기의 설계를 위한 네트워크 지연에 따른 제어 성능 저하의 보상 방법을 제안하고자 한다.

본 논문에서는 장애물 회피 알고리즘 중 대표적인 반응 제어 방식 장애물 회피 알고리즘인 VFH를 기반으로 한다. VFH 알고리즘이 적용된 네트워크 기반 시스템에 제어 보상이 적용 되지 않은 경우 필연적으로 발생하는 두 가지 문제점이 있다. 첫째, 네트워크 시스템에서 네트워크 지연에 의해 센서 모듈의 환경 센서 정보가 수집 되는 시점이 지연되고, 브레인 모듈에서 VFH 알고리즘이 연산 되는 시점에 지연된 환경 센서 정보로 연산이 수행된다. 결과적으로 VFH 알고리즘은 환경 센서 정보가 지연 된 것 때문에 성능 저하의 가능성이 생긴다. 환경 센서 정보를 보상하기 위해서 네트워크 지연을 타임스탬프 방식으로 측정하고, 환경 정보를 로봇 기구학 모델을 기반으로 계산한다. 둘째, VFH 알고리즘에서 위치판단이 중요할데, 네트워크 기반 로봇에서는 네트워크 지연 때문에 위치판단이 부정확해 진다. 본 논문에서의 위치판단은 환경 센서 정보를 사용한 확률적인 위치판단과 주행거리계만을 사용한 위치판단의 센서융합을 통한 위치판단 결과로 위치판단이 수행되며 센서융합은 위치판단 과정에서의 융합시점에 포함된 딜레이를 고려하여 칼만 필터를 사용한 센서융합이 수행 된다.

본문에서는 자율 이동 로봇 시스템에서 대해 기술하고, 보상 제어 전략을 기술한다. 그리고 네트워크 지연이 고려된 네트워크 기반 로봇에서의 센서 정보 취득에 적용된 칼만 필터에 대해 기술하고 제안된 성능 향상 전략을 효율성과 안착률에 대한 비교를 통해 입증한다. 마지막으로 결론을 기술한다.

2. 본 론

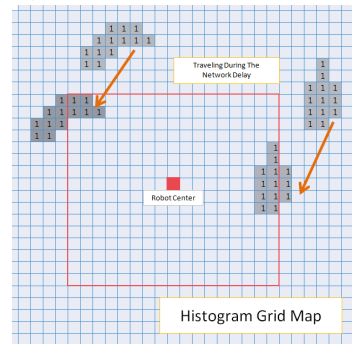
2.1 네트워크 기반 자율 이동 로봇의 시스템 구성

본 논문의 대상이 되는 로봇은 센서모듈, 모빌리티 모듈, 브레인 모듈로 구성 된다. 각 모듈은 특정 기능을 수행하며, 모듈 간 정보의 흐름은 네트워크로 연결되어 통합적으로 운영되는 구조이다. 센서 모듈은 레이저 센서 정보를 수집하고, 수집된 센서 정보를 다른 모듈에 전송하는 역할을 수행하며 모빌리티 모듈은 실제 구동부를 제어하는 역할과 엔코더 정보로 주행거리계 정보를 계산 후 다른 모듈에 전송하는 역할을 수행한다. 브레인 모듈은 센서 정보와 주행거리계 정보를 수신하여 VFH 알고리즘을 포함한 다양한 연산을 수행하고 이동 명령을 모빌리티 모듈로

전송하는 역할을 수행한다. 본 논문의 VFH 알고리즘 제어 프로그램은 브레인 모듈 내부의 확률적 위치판단 정보와 모빌리티 모듈로부터의 주행거리계 정보를 수신하여 칼만 필터 알고리즘을 이용한 에러 보상과 센서 융합 과정을 수행하여 최종 위치판단 정보를 생성하고 장애물 회피를 수행한다. 여기서 브레인 모듈 내부에서의 위치판단은 HRI(Human-Robot Interface) 장치를 통해 사용자로부터 전역 지도 정보를 취득하여 취득된 전역 지도 정보와 센서모듈로부터의 환경 센서 정보를 이용한 확률 연산을 통해 수행된다.

2.1 Vector Field Histogram 알고리즘의 네트워크 지연 환경 센서 정보의 보상 알고리즘

본 연구의 자율 이동 로봇, 센서 모듈로부터 센서 정보가 다른 모듈로 전송되는 시점에서 히스토그램 격자맵은 지연이 포함될 가능성이 있으며 히스토그램 격자 지도는 현재 센서 정보를 취득하는 과정에서 항상 지연으로 인한 부정확성(uncertainty)의 위험에 노출된다. 히스토그램 지도의 부정확성은 폴라 히스토그램의 부정확성을 유발하고 비효율적인 로봇의 움직임으로 이어지게 되어 최악의 경우, 폴라 히스토그램의 부정확성으로 인해 장애물과 로봇이 충돌하는 경우도 발생한다. 따라서 본 연구에서는 지연된 센서 정보로 생성된 히스토그램 격자 지도를 지연 시간동안의 주행거리에 따른 히스토그램 격자 지도의 이동으로 보상하는 방법을 제안한다.



<그림 5> 네트워크 지연이 보상된 히스토그램 격자 지도

2.2 위치판단을 위한 네트워크 지연 보상 Kalman Filter 알고리즘

본 논문에서는 대표적인 센서 융합 기법인 칼만 필터(Kalman filter) 알고리즘을 적용하여 보다 정확한 로봇의 위치판단 및 네트워크 지연 보상 방법을 제안한다. 위치판단 알고리즘은 환경 센서 정보와 주어진 지도 정보를 사용하는 파티클 필터(particle filter)와 지도 비교(map matching)를 통해 자신의 위치를 확률적으로 판단하는 MCL(Monte Carlo Localization) 알고리즘을 사용하였으며 이를 칼만 필터의 관촬 모델에 적용하였다. 또한 칼만 필터의 보정 시간 중에 갱신되는 오차 공분산의 최소화를 위해 칼만 이득(Kalman gain)을 사용하여[3]. 오차 공분산 행렬을 도출하였다. 도출된 칼만 필터를 네트워크 기반 자율 이동 로봇에서의 센서 융합에 사용하면 센서 융합이 수행 될 때 뿐 만 아니라 환경 센서 정보가 수집 될 때도 시점의 불일치 문제가 발생한다. 그렇기 때문에 로봇의 기구학 모델과 측정된 네트워크 딜레이로 네트워크 기반 자율 이동 로봇에 적합한 칼만 필터 알고리즘을 제안한다.

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k-1} + A \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \\ \cos \theta \\ \frac{\Delta t_{odm}}{2} \\ \sin \theta \\ \frac{\Delta t_{odm}}{2} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_k^r + \delta_k^t \\ \delta_k^r - \delta_k^t \\ 2 \\ \delta_k^r - \delta_k^t \\ 2a \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta t_{odm} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta t_{odm} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$z_k = Bf(\hat{x}_k, S, M) \quad (21)$$

네트워크 전송상의 지연을 고려한 식과 네트워크 지연 시간이 고려된 보상 행렬 A 를 식 (19)와 같이 도출하였으며 본 논문에서는 식 (21)에서와 같이 환경 센서 정보만을 보상하였다. 식 (21)의 행렬 B 는 로봇 기구학을 이용한 네트워크 지연 보상을 위한 것이며, 식 (20)과 유사하게 식 (22)로 표현된다. 그리고 식 (22)의 Δt_{loc} 는 센서 모듈로부터 취득된 환경 센서 정보의 네트워크 지연이다.

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta t_{loc} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta t_{loc} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

2.3 네트워크 지연 보상 알고리즘의 실험 및 결과

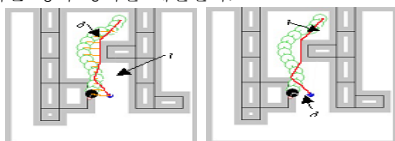
본 논문에서 제안한 네트워크 지연 보상 알고리즘 실험 환경 구성은 다음과 같다. 네트워크 기반 자율 이동 로봇의 센서모듈과 모델러티 모듈을 Anycode社의 MRS(Marilou Robotics Studio)라는 로보틱스 시뮬레이터(robotics simulator)를 이용하여 구현 하였다. MRS로 구현된 가상환경을 으로부터 LRF 센서 정보와 엔코더 정보가 브레인 모듈로 송신되고 브레인 모듈로부터 모터 드라이빙 명령을 수신하는 구조이다.

브레인 모듈은 수신된 엔코더 정보를 주행거리계 정보로 연산하는 현재위치판단과정과 MCL 알고리즘이 수행되는 부분, LRF 센서 정보와 주행거리계 정보를 센서 융합하여 최종 위치 판단 부분, VFH 알고리즘 수행 부분으로 구성되어 있으며 경로 계획(path planning)은 가시성 그래프(visibility graph)를 사용하였다.

〈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 1은 지연보상실험을 위한 네트워크 전송 메시지 정의이며, 네트워크 지연시간의 측정을 위해 타임스탬프(time-stamp) 방식을 사용했다. 네트워크 지연 모델은 CAN 통신 프로토콜을 모델링하여 각 네트워크 메시지의 송수신 시점에서 지연시간을 측정하고, CAN 통신 프로토콜의 전송시 발생하는 지연시간을 포함하였다. 또한 모든 기능이 구현된 네트워크 기반 로봇을 모사하기 위하여 더미 태스크(dummy task)를 포함한 메시지를 정의하였다. 본 논문에서는 제안된 장애물 회피 알고리즘의 효율을 정량적으로 평가하기 위하여 그림 8과 같이 이동경로 효율평가와 목표지점 도착률 평가 항목을 제안한다.



〈그림 8〉 장애물 회피 알고리즘의 정량적 평가 지표



(1) 네트워크 지연 없는 VFH 알고리즘 (2) 네트워크 지연 + 미보상 VFH 알고리즘 (3) 네트워크 지연 + 보상 VFH 알고리즘

〈그림 9〉 환경 케이스1에서의 4.5km/h 속도 장애물 회피 경로 비교



(1) 네트워크 지연 없는 VFH 알고리즘 (2) 네트워크 지연 + 미보상 VFH 알고리즘 (3) 네트워크 지연 + 보상 VFH 알고리즘

〈그림 10〉 환경 케이스2에서의 8km/h 속도 장애물 회피 경로 비교

〈표 2〉 환경 케이스1 에서의 4.5km/h 속도 장애물 회피 경로 평가

알고리즘	(1)의 경우	(2)의 경우	(3)의 경우
성능			
이동 경로 효율(p)	1.0250	1.2312	1.0563
목표지점 도착률(a)	0.0151	0.1151	0.0181
경로 길이(l')	9.3m	11.5m	9.7m
주행 시간(t')	31.655s	35.520s	31.835s
평균 속도(v')	0.294m/s (1.058km/h)	0.324m/s (1.167km/h)	0.305m/s (1.098km/h)

〈표 3〉 환경 케이스2 에서의 8km/h 속도 장애물 회피 경로 평가

알고리즘	(1)의 경우	(2)의 경우	(3)의 경우
성능			
이동 경로 효율(p)	0.0157	0.0291	0.0186
목표지점 도착률(a)	0.0097	0.0420	0.0097
경로 길이(l')	17.5m	19.95m	17.6m
주행 시간(t')	53.790s	64.564s	54.223s
평균 속도(v')	0.325m/s (1.170km/h)	0.302m/s (1.087km/h)	0.324m/s (1.166km/h)

그림 9는 가로 4m, 세로 6m 환경을 1:1 스케일로 적용하였으며 로봇의 최고속도를 성인 남성이 걷는 평균 속도인 4.5km/h(1.25m/s)로 설정한 S자 커브의 주행거리인 환경 케이스1의 실험결과이다. 그림 10은 가로 12m, 세로 8m 환경으로 로봇의 최고속도를 성인 남성이 숨이 차지 않고, 지속적으로 달릴 수 있는 속도인 8km/h(2.22m/s)로 설정하였으며 고정 장애물이 추가되어 환경 케이스1에 비해 복잡한 주행경로를 갖는 환경 케이스2의 실험결과이다. 각 그림의 (1)은 네트워크 지연이 없는 경우, (2)는 네트워크 지연에 대한 보상이 없는 경우, (3)은 네트워크 지연에 대한 보상된 알고리즘을 적용한 경우의 결과이다. 표2와 표3은 환경 케이스1과 환경 케이스2에 대한 제안한 정량적 평가지표의 결과를 정리한 표이다. 환경 케이스1과 환경 케이스2의 그림 (2)를 보면 네트워크 지연이 발생한 구간은 주행거리가 상대적으로 길고 방향전환이 급격하게 일어남을 알 수 있었으며 이를 보상한 그림 (3)의 경우, 그림 (1)의 이상적인 주행 경로와 가시적으로 유사한 경로를 보이는 것을 알 수 있었다. 표2와 표3의 (1)과 (3)의 정량적 값을 비교해보면 네트워크 지연이 없는 상황과의 이동 경로 효율과 목표 지점 도착률이 수치적으로 근사한 결과를 보이는 것을 알 수 있었다. 또한 환경 케이스1과 환경 케이스2의 결과를 통해 두 배의 환경 넓이 및 다수의 장애물이 포함된 환경과 로봇최고이동속도를 약 2배로 확장하여도 제안한 주행 알고리즘의 성능 차이가 없는 것을 실험적으로 증명하였다.

3. 결 론

본 연구에서는 VFH 알고리즘을 네트워크 기반 자율 이동 로봇에 적용하였을 때 나타나는 문제점에 대한 분석 및 보상 방식을 제안하였다. 첫 번째로 문제점으로, 본 논문에서 대상으로 하는 네트워크 기반 자율 이동 로봇의 경우에 VFH 알고리즘의 수행 시점과 네트워크를 통해 전송 되어지는 환경 정보의 취득 시점 불일치 문제로 발생하는 과거 환경 정보 입력으로 인하여 발생하는 장애물 회피 성능의 저하 문제점을 보상하였다. 취득 시점의 불일치에 대한 보상으로 방법으로 타임스탬프 방식을 통한 네트워크 지연 시간 측정과 로봇의 기구학 모델을 통해 예측된 현재의 환경 센서 정보를 이용하는 VFH 알고리즘을 제안하였다. 두 번째 문제점으로, 네트워크 기반 자율 이동 로봇에 VFH 알고리즘을 적용 했을 때, 정확한 위치판단 결과를 보장 받을 수 없다는 문제점이다. 그 해결법으로 주행거리계만을 이용하는 위치판단과 확률적으로 위치판단을 하는 알고리즘의 센서 융합하는 방법을 제안 하였다. 위치판단 과정에서 환경 센서 정보의 지연과 주행거리계의 과거 정보 문제는 주행거리계의 경우 칼만 필터를 사용하여 보상을 하고, 환경 센서 정보의 경우 로봇 기구학을 이용해 보상을 하는 방법을 제안하였다. 실험 결과의 정량적인 성능 비교를 위하여 경로의 효율성과 목표 지점 도착률에 대한 정량적인 평가방법을 제안하였으며, 효율적인 이동 경로 생성 능력과 목표지점 도착률의 관점에서 제안된 보상 방식을 사용했을 때와 그렇지 않은 경우에 대한 두 가지 환경에서의 각기 다른 속도의 실험을 통해 성능 비교를 하여, 제안된 보상 방식의 신뢰성과 효율성을 입증하였다. 향후 연구과제로는 본 연구에서 제안한 시간지연 보상 알고리즘을 동적 장애물이 존재하는 환경으로 확대하는 연구가 필요하며, 다양한 환경조건에서 다양한 장애물의 존재할 때 효율적인 시간지연보상알고리즘의 개발이 요구된다.

[참 고 문 헌]

- [1] H.Bruyninckx, P.Soetens, and B.Koninckx, "The Real-Time Motion Control Core of the Orocos Project," Proceedings of International Conference on Robotics and Automation, pp.2766-2771, 2003.
- [2] H.Utz, S.Sablatnog, S.Enderle, and G.Kraetschmar, "Miro-Middleware for Mobile Robot Applications," IEEE Transactions on Robotics and Automation Vol.18 No.4, pp.493-497, 2002.
- [3] A. Mota, P.Fonseca, J.A Fonseca, " System Modelling and Identification in CAN based Distributed Control Systems," IFAC Workshop on Distributed Computer Control Systems, 2000.