

이동 통신 환경에서 가상 중간점 및 등속도 모델링을 통한 위치 추정 오차 저감 기법

장현빈, 김채영, 안지훈, 이종학, 배석현, 정수민*
금오공과대학교

gusqls4866@kumoh.ac.kr, sumin.jeong@kumoh.ac.kr

A Position Estimation Method Based on Ultrasonic Sensors Using Virtual Sensing Point and Constant Velocity Compensation

Hyunbin Jang, Chaeyoung Kim, Jihoon An, Jonghak Lee, Seokhyeon Bae
and Sumin Jeong *
Kumoh National Institute of Technology.

요 약

본 논문은 2 개의 초음파 센서를 이용해 비행시간(Time-of-Flight) 비율로 위치를 추정하고, 등속도 기반 보정 기법을 도입하여 추정 정확도를 개선하는 차량 센서 네트워크용 장애물 위치 추정 기법을 제안한다. 두 센서 사이의 선형적 위치에 가상의 측정 점을 가정하여 위치 좌표를 추정하고, 측정 시간 간격 별 변위에 대한 속도를 계산하여 누적 오차를 감소시킨다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안하는 기법의 평균 제곱 오차(NMSE) 성능을 증명하였다.

I. 서 론

초음파 센서를 활용한 위치 추정 기술은 자율주행 로봇, 실내 내비게이션, 스마트 물류 등 다양한 분야에서 널리 활용되고 있다. 최근에는 신호의 비행 시간(ToF) 정보를 센서 간 비율이나 신호세기, 경로 손실 모델 등으로 가공하여 환경 변화에 강인한 위치 추정 알고리즘을 개발하려는 연구가 활발히 이루어지고 있다[1-5]. [1-3]에서는 신호 임계값 조정과 불확실성 분석 기법을 적용한 위치 추정 알고리즘, [4]에서는 센서 위치 오차를 고려한 강인한 위치 추정 모델 기반 위치 추정 알고리즘, 그리고 [5]에서는 ToF 비율 기반 위치 추정 기법을 제안하였다. ToF 비율 기반 위치 추정 기법은 초음파 속도나 온도 보정 없이도 위치를 계산할 수 있는 장점이 있으나, 각 시점의 추정이 독립적으로 수행되어 연속 추정 시 오차가 누적되는 한계가 있다. 본 논문에서는 이를 해결하기 위해, 연속적으로 추정된 위치 좌표 간의 변위를 추정하고 이를 바탕으로 속도를 계산하여 위치 좌표 추정 정확도를 개선하는 등속도 가정 기반 보정 방법을 적용한 차량 센서 네트워크용 장애물 위치 좌표 추정 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘의 성능은 시뮬레이션 결과를 통해 증명한다.

II. 제안하는 논문

II-1. 시스템 모델

그림 1 에서 보여주는 바와 같이 차량에는 센서 1 과 센서 3 가 배치되어 있다. 본 논문에서는 이 센서 1 과 센서 3 사이에 선형적으로 배치되어 있는 가상의 센서 2 가 있다고 가정한다. 따라서 가상의 2 차원 평면 상에서 각 센서는 $S_1(-a, 0)$, $S_2(0, 0)$, $S_3(a, 0)$ 에 위치하고 목표

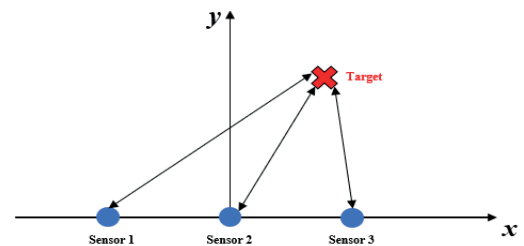


그림 1. 시스템 모델 개요도

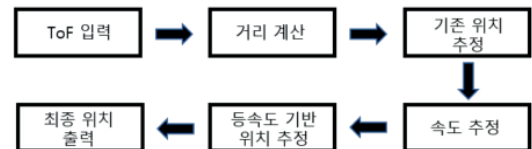


그림 2. 제안하는 위치 추정 알고리즘

대상은 가상의 원점에 대해 상대 위치 (x, y) 에 존재한다고 가정한다. 따라서 센서로부터 목표까지의 거리는 다음과 같다:

$$l_i = \frac{c\Delta t_i}{2}, \text{ for } i \in \{1, 2, 3\} \quad (1)$$

여기서 c 는 초음파의 전파 속도, Δt_i 는 센서 i 에서 측정된 왕복 전파 지연 시간을 의미한다.

II-2. 제안하는 위치 추정 알고리즘

제안하는 추정 알고리즘은 그림 2 에 보인바와 같이 각 센서에서의 비행시간(ToF)을 측정하여 해당 위치를 추정 수행된다. 센서 1 과 3 에서 측정된 왕복 전파 지연 시간을 기반으로 가상의 센서 2 에서의 왕복 전파 지연 시간을 다음과 같이 구할 수 있다:

$$\Delta t_2 = \sqrt{\frac{c^2 \Delta t_1^2}{2} + \frac{c^2 \Delta t_3^2}{2} - a^2} \quad (2)$$

이를 바탕으로 목표 대상의 위치 좌표에 대한 식을 다음과 같이 구할 수 있다:

$$\hat{x} = \frac{a^2(\Delta t_3^2 - \Delta t_1^2)}{2a(2\Delta t_2^2 - \Delta t_3^2 - \Delta t_1^2)} \quad (3)$$

$$\hat{y} = \sqrt{\frac{2a^3\Delta t_2^2}{a(\Delta t_3^2 + \Delta t_1^2 - 2\Delta t_2^2)} - \left(\frac{a^2(\Delta t_3^2 - \Delta t_1^2)}{2a(2\Delta t_2^2 - \Delta t_3^2 - \Delta t_1^2)}\right)^2} \quad (4)$$

이를 동일한 시간 간격 τ 를 가지는 N 개의 시간 슬롯에 대해 반복하여 $\hat{\mathbf{x}} = \{\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_N\}$, $\hat{\mathbf{y}} = \{\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_N\}$ 를 누적하여 추정한다.

이 시간 슬롯이 충분히 짧다고 가정하면 전체 시간 동안 추정 대상은 등속도 운동을 한다고 가정할 수 있다. 이에 따라

$$\hat{x}_{n,v} = \hat{x}_{n-1} + \hat{v}_{x,n-1}\tau \quad (5)$$

$$y_{n,v} = \hat{y}_{n-1} + \hat{v}_{y,n-1}\tau \quad (6)$$

로 근사할 수 있다. 여기서 $\hat{v}_{x,n-1} = \frac{\hat{x}_n - \hat{x}_{n-1}}{\tau}$ 와 $\hat{v}_{y,n-1} = \frac{\hat{y}_n - \hat{y}_{n-1}}{\tau}$ 는 시간 간격 $n-1$ 과 n 사이에서 추정된 속도를 의미한다. 최종 위치 좌표의 추정값은 \hat{x}_i 와 $\hat{v}_{x,i}$ 의 평균값과 \hat{y}_i 와 $\hat{v}_{y,i}$ 의 평균값이 된다.

III. 시뮬레이션 성능 분석

제안하는 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 실험적 성능평가를 수행하였다. 이 때 $(x, y) = (2, 3)$ 으로 임의로 고정하였고 해당 좌표를 추정하였다: $S_1 = (-0.9, 0)$, $S_3 = (0.9, 0)$. 초음파 속도는 350m/s, 파일럿 전송 간격은 기본적으로 0.01s로 고정하고 센서에서 측정되는 왕복 전파 지연 시간에는 평균이 0인 정규 분포를 따르는 랜덤 시간 오차를 추가하였다. 실험 조건별로 Monte Carlo 시뮬레이션을 100,000회 반복하여 정규화 평균 제곱 오차(NMSE)를 계산하였다.

그림 3은 시간 지연 추정값에 포함된 오차 분산에 대한 NMSE 성능을 보여준다. 기존 방식[5]은 오차 분산의 영향이 급격히 증가하지만 제안된 기법은 잡음에 덜 민감함을 볼 수 있다. 이는 등속도 기반 보정이 측정 잡음의 누적 오차를 효과적으로 억제함을 보여준다.

그림 4는 위치 추정 시 사용된 파일럿 수에 대한 NMSE 성능을 보인다. 파일럿 수에 따라 성능이 지속적으로 개선됨을 보인다. 이는 제안 알고리즘이 요구하는 파일럿 수에 대한 벤치마크를 제공한다.

IV. 결론

본 연구에서는 초음파 센서 기반 위치 추정 기법에 등속도 보정 알고리즘을 적용하여 기존 방식보다 위치 추정 성능 개선했다. 시뮬레이션을 통해 제안 기법이 다양한 오차 조건에서도 우수한 성능을 보임을 증명하였다. 향후에는 실제 하드웨어 성능을 검증하고, 곡선 궤적이나 비등속도 상황에서도 적용 가능한 모델로

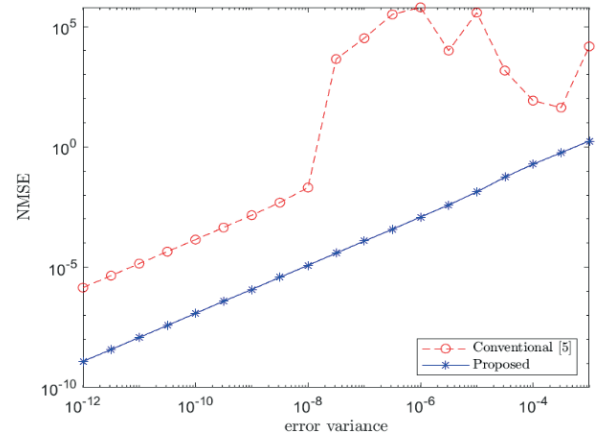


그림 3. 시간 지연 오차 분산에 따른 NMSE 성능

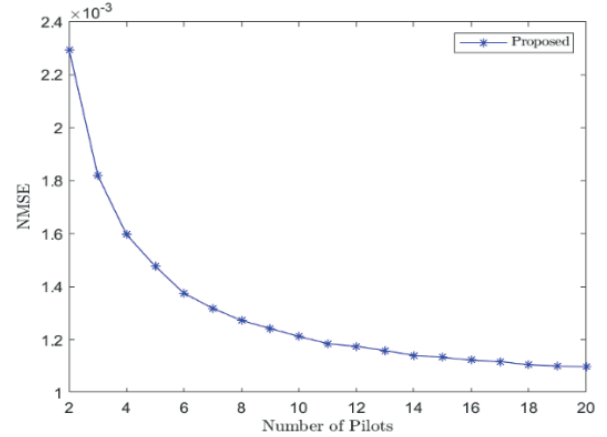


그림 4. 파일럿 수에 따른 제안 NMSE 성능

확장할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-지역지능화혁신인재양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (IITP-2025-RS-2020-II201612).

참 고 문 헌

- [1] 노동진, 주재한, 박성현, 김민석, 김석찬. (2024). 수신기별 신호 세기 기반 가변 임계값을 적용한 초음파 신호 위치 추정 알고리즘. 한국통신학회 학술대회논문집, 경북.
- [2] 노동진, 임재준, 주재한, 김민석, 김석찬. (2024). 초음파 신호 기반 위치 추정 알고리즘의 개선을 위한 경로 손실 모델 추정. 한국통신학회 학술대회논문집, 제주.
- [3] 정과철, 이수영. (2021). 초음파를 이용한 이동 로봇 위치 추정 및 불확실성 분석. 한국생산제조학회 학술발표대회 논문집, 제주.
- [4] X. Zhang, Y. Li, and Z. Wang, "Hybrid robust sequential fusion estimation for WSN-assisted moving-target localization with sensor-node-position uncertainty," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 69, no. 4, pp.6499-6508, Apr.2020.
- [5] M.Shen, Y.Wang, Y. Jiang, H. Ji, B. Wang, and Z. Huang, "A new positioning method based on multiple ultrasonic sensors for autonomous mobile robot," Sensors, vol.20, no. 1, 17, Jan. 2020.