

자율 주행 로봇 플랫폼 진동에 따른 스캔 데이터 왜곡 완화 기법

이서윤, 이헌철*

금오공과대학교 IT 융복합공학과

lsylklk0909@kumoh.ac.kr, *hcllee@kumoh.ac.kr

Mitigation of Scan Data Distortion Caused by Vibration in Autonomous Mobile Robot Platforms

Seoyoon Lee, Heoncheol Lee*

Department of IT Convergence Engineering, Kumoh National Institute of Technology

요 약

본 논문에서는 초소형 이동 로봇 플랫폼에서 주행 진동으로 인해 발생하는 데이터 왜곡 문제를 해결하기 위해 PSO-PF 기반 확률적 데이터 안정화 기법을 제안한다. 제안된 기법은 영상 워핑에 의존하는 기존 영상 안정화 방식의 한계를 극복하고, 파티클 필터를 통해 센서 노이즈와 진동을 확률적으로 모델링함으로써 Depth 데이터의 불연속성과 고주파 변동을 효과적으로 완화한다. 또한, 파티클 필터의 지역적 수렴 문제를 보완하기 위해 입자 군집 최적화 알고리즘을 결합하여 전역 탐색 능력을 강화하였다. 실험 결과, 다양한 진동 조건과 객체 크기 환경에서 거리 추정의 안정성과 시간적 연속성이 향상됨을 확인하였으며, 제안된 PSO-PF 구조는 진동 환경에서도 신뢰성 있는 위치 추정을 가능하게 하는 효과적인 데이터 안정화 방법임을 입증하였다.

I. 서론

초소형 이동 로봇 플랫폼은 경량화와 소형화를 통해 협소한 환경에서도 운용이 가능하다는 장점을 가지지만, 구조적 특성상 기구적 안정성이 낮아 주행 중 발생하는 미세한 진동과 외란에 취약하다. 이러한 진동은 로봇에 탑재된 센서 데이터에 직접적인 영향을 미치며, 특히 Depth 카메라 기반 인식 및 위치 추정 시스템에서는 프레임 간 시점 흔들림으로 인한 데이터 왜곡과 좌표 불연속성이 빈번하게 발생한다. 그 결과, 객체 위치 추정의 신뢰도가 저하되고, SLAM 및 Localization 과정에서 누적 오차가 증가하는 문제가 발생한다.

기존의 영상 안정화 기법은 Optical Flow 나 키포인트 매칭을 통해 카메라 이동을 추정하고, 왜곡 스무딩 및 영상 워핑을 수행함으로써 시각적 흔들림을 완화하는 데 초점을 둔다. 그러나 이러한 방식은 영상 자체를 변형하는 워핑 과정을 포함하기 때문에 해상도 손실과 함께 데이터 왜곡을 유발하며, 이는 거리 기반 추정 정확도가 중요한 초소형 로봇 환경에서는 치명적인 한계로 작용한다.

본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해, 영상 변형에 의존하지 않고 센서 데이터의 확률적 특성을 직접 모델링하는 파티클 필터(Particle Filter, PF)[1] 기반 안정화 기법을 도입하였다. 더 나아가, PF의 지역적 수렴 한계를 보완하기 위해 입자 군집 최적화 알고리즘(Particle Swarm Optimization, PSO)[2]을 결합한 PSO-PF 기반 데이터 안정화 구조를 제안한다. 제안된 기법은 진동 환경에서도 안정적인 Depth 추정을

가능하게 하여, 초소형 로봇 플랫폼의 위치 추정 정확도를 효과적으로 향상시키는 것을 목표로 한다.

II. 본론

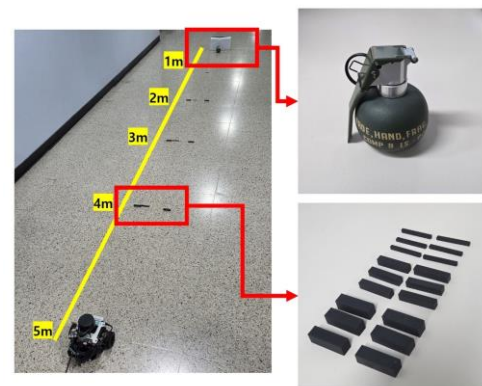


그림 1. 바닥 트리거 기반 흔들림 환경 재현

초소형 로봇 플랫폼에서 발생하는 진동 기반 데이터 왜곡 현상을 분석하기 위해, 본 연구에서는 인위적으로 진동을 재현할 수 있는 실험 환경을 구성하였다. 그림 1 과 같이 바닥면에 3D 프린팅 기반의 물리적 트리거 구조물을 설치하고, 로봇이 해당 구조물을 통과할 때마다 반복적인 진동이 발생하도록 환경을 설계하였다. 이를 통해 실제 트리거 부착 로봇과 유사한 주행 진동 조건을 효과적으로 재현하였다.

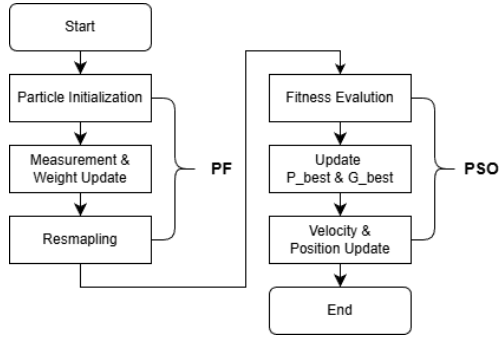


그림 2. PSO-PF 기반 안정화 기법 순서도

이러한 진동 환경에서의 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 파티클 필터 기반의 확률적 데이터 안정화 기법을 적용하였다. 파티클 필터는 비선형·비가우시안 환경에서도 상태 추정이 가능한 Monte Carlo 기반 알고리즘으로, 센서 노이즈와 진동을 상태공간 내 확률 분포로 모델링한다. 각 파티클은 로봇의 가능한 상태를 나타내며 측정 업데이트와 가중치 계산, 리샘플링 과정을 반복 수행함으로써 센서 데이터의 불확실성을 통계적으로 평활화한다. 진동으로 인해 발생하는 Depth 데이터의 급격한 변화는 확률 분포 내 비정상 샘플로 표현되며, 반복적인 리샘플링을 통해 자연스럽게 제거된다.

그러나 단일 PF 구조는 파티클 수 증가에 따른 계산 복잡도 상승과 함께, 특정 구간에 국소적으로 수렴하는 지역 최적해 문제를 내포한다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 그림 2 와 같이 PSO 알고리즘을 PF 구조에 결합한 PSO-PF 구조를 설계하였다. PSO 는 각 입자가 개인 최적값과 전역 최적값을 동시에 고려하여 탐색을 수행함으로써, 입자 군집 전체가 전역 최적해로 수렴하도록 유도한다. 본 연구에서는 PF 단계에서 1 차 안정화된 결과를 PSO 의 초기 입자 집합으로 설정하고, 이를 기반으로 전역 최적화 탐색을 수행하였다. 이를 통해 파티클 수를 무작정 증가시키지 않고도 안정적인 추정 성능을 유지할 수 있어, 초소형 로봇 플랫폼과 같이 연산 자원이 제한된 환경에서도 실시간 적용 가능성을 확보하였다.

PSO 단계에서는 각 입자의 적합도를 오차 함수로 정의하고, 입자 간 정보 공유를 통해 위치 및 속도 벡터를 갱신하였다. 이를 통해 PF 의 빠른 반응성과 PSO 의 전역 탐색 능력이 결합되어, 고주파 진동 구간에서도 안정적이고 일관된 Depth 추정이 가능해졌다.

III. 결론

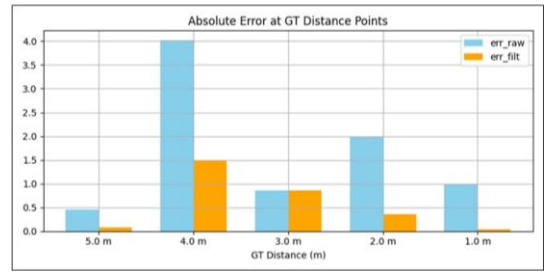
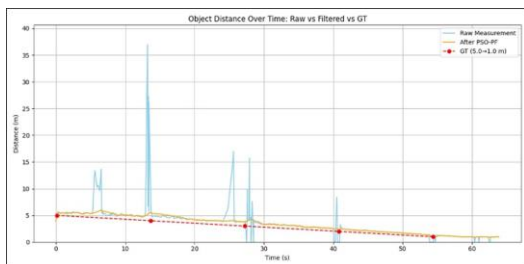


그림 3. Trigger 0.5 cm 환경에서의 PSO-PF 적용 결과

본 연구에서는 그림 3 과 같이 저진동 환경에서 PSO-PF 기반 안정화 기법의 성능을 분석하였다. 실험 결과, Raw 데이터에서 관찰되던 순간적인 거리 스파이크와 불연속 현상이 필터 적용 후 효과적으로 억제되었으며, 전체 거리 구간에서 GT 곡선과 유사한 형태로 안정화됨을 확인하였다. 특히 중간 거리 구간에서 발생하던 큰 오차가 현저히 감소하여, 평균 오차가 약 80% 이상 개선되는 결과를 보였다. 이를 통해 제안된 PSO-PF 알고리즘이 중간 강도의 진동 환경에서도 데이터 왜곡을 효과적으로 보정하고, 거리 추정의 정확도와 시간적 연속성을 동시에 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported in part by the IITP(Institute of Information & Communications Technology Planning & Evaluation)-ITRC(Information Technology Research Center) grant funded by the Korea government(Ministry of Science and ICT)(IITP-2026-RS-2024-00438430, 50%), and in part by the Gyeongsangbuk-do RISE (Regional Innovation System & Education) project (Specialized University unit).

참 고 문 헌

- [1] J. U. Cho, S. H. Jin, X. D. Pham, J. W. Jeon, J. E. Byun, and H. Kang, "A Real-Time Object Tracking System Using a Particle Filter", 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Beijing, China, pp. 2822-2827, Oct. 2006.
- [2] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks, Perth, WA, Australia, 1995, pp. 1942-1948 vol.4