

최소자승법과 입자 군집 최적화 기법의 자기 위치 추정 정확도 비교

김종희*, 최인식**, 조수현***

Comparison of Self-Position Estimation Accuracy between Least Square Method and Particle Swarm Optimization

Jonghee Kim*, In-Sik Choi**, and Soohyun Jo***

본 결과물은 2025년도 교육부 및 대전광역시의 재원으로 대전 RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다(과제번호: 2025-RISE-06-013)

요 약

본 논문은 GPS(Global Positioning System)-denied 환경에서 입자 군집 최적화(PSO, Particle Swarm Optimization) 기법을 이용한 자기 위치 추정 알고리즘을 제안한다. 기존의 연구에서와 마찬가지로 회전하는 계단 주파수 레이더로 기준 표적으로부터 반사 신호를 수신하고, EP(Evolutionary Programming)-based CLEAN 알고리즘을 통해 기준 표적의 거리 정보를 정밀하게 추출한다. 또한, CNN(Convolutional Neural Network)을 이용해 거리-표적 짝짓기(Range-target association)를 수행하고, 마지막으로 PSO를 적용해 위치를 추정한다. 시뮬레이션 결과, 제안된 기법은 기존 최소자승법(LS, Least Square) 방식보다 모든 신호대잡음비(SNR, Signal-to-Noise Ratio)에서 더 낮은 RMSE(Root Mean Square Error)를 가짐을 확인하였다.

Abstract

This paper proposes a novel algorithm for self-position estimation algorithm in Global Positioning System (GPS)-denied environments using Particle Swarm Optimization (PSO). A rotating stepped-frequency radar is used to receive reflected signals from reference targets as in previous research, and the distances to these targets are precisely extracted using an Evolutionary Programming (EP)-based CLEAN algorithm. A Convolutional Neural Network (CNN) is then utilized for associating each reference targets with its corresponding extracted distances, and PSO is subsequently applied to estimate the radar's position. Simulation results demonstrate that the proposed method achieves a lower Root Mean Square Error (RMSE) across all Signal-to-Noise Ratio (SNR) compared to the conventional Least Squares (LS) approach.

Keywords

self-position estimation, particle swarm optimization, stepped-frequency radar, least square, convolutional neural network

* 한남대학교 전기전자공학과 석사과정

- ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8831-5114>

** 한남대학교 전기전자공학과 교수(교신저자)

- ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8210-0843>

*** 국가보안기술연구소 사이버안전보훈센터 선임연구원

- ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1828-2814>

• Received: Oct. 15, 2025, Revised: Nov. 02, 2025, Accepted: Nov. 05, 2025

• Corresponding Author: In-Sik Choi

Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Hannam University, 70

Hannam-ro, Daeduk-gu, Daejeon, 34430, Korea

Tel.: +82-42-629-8568, Email: recog@hnu.kr

1. 서 론

최근 UAV(Unmanned Aerial Vehicle)와 USV(Unmanned Surface Vessel) 자율 시스템이 다양한 분야에서 널리 활용되고 있다[1]. 이에 따라 GPS(Global Positioning System) 신호가 차단되거나 왜곡되는 GPS-denied 환경에서도 정확한 위치 추정이 가능한 기술 개발이 중요한 과제로 부상하고 있다. 현재 연구되고 있는 위치 추정 기술로는 사전 구축 지도와 실시간 레이더 데이터를 결합한 위치 추정, 앵커 노드와 다중 센서를 결합한 연구 등이 있다[1][2]. 하지만, 이들 연구는 사전 구축 지도의 의존성 문제, 다중 센서 간 시간 동기화 문제, 그리고 외부 통신 인프라에 대한 의존성이라는 한계를 갖는다.

이러한 문제를 해결하고자, 외부와의 통신 인프라를 이용하지 않고 플랫폼에 장착된 레이더 센서만을 사용하는 자기 위치 추정 체계가 제안되었다[3]. 참고문헌 [3]에서는 회전하는 계단 주파수 레이더로 기준 표적에 대한 수신 데이터를 획득하고, EP-based CLEAN[4]과 LS를 이용해 자기 위치를 추정하였다. 본 연구에서는 CNN을 이용하여 거리-표적 짝짓기를 수행하고 참고문헌 [3]의 자기 위치 추정 성능을 향상시키고자 PSO 알고리즘을 이용하였으며[5], 시뮬레이션을 통해 LS 기법과 성능을 비교 분석하였다.

II. PSO 기반 자기 위치 추정 기법

본 연구에서는 계단 주파수 레이더와 기준 표적을 이용한 PSO 기반의 자기 위치 추정 알고리즘을 제안한다. PSO 기반 위치를 추정하기 위해서는 두 가지 핵심적인 과정이 필요하다.

하나는 정확한 거리 정보의 추출이며, 다른 하나는 추출된 거리 정보가 어떤 기준 표적으로부터 얻어진 것인지 식별하는 거리-표적 짝짓기 과정이다. 먼저 거리 정보 추출을 위한 데이터는 회전하는 계단 주파수 레이더를 통해 획득된다. 이 레이더는 360도로 회전하며, 사전에 배치된 4개의 기준 표적으로부터 반사되는 신호를 수신한다. 각 기준 표적은 그림 1에서 보는 바와 같이 고유한 특징을 갖고 있으며, 이에 따라 반사 신호에도 고유한 패턴이 형

성된다. 모든 기준 표적은 3개의 점 산란체로 구성되어 있으며, 이들 산란체 간의 거리와 반사 신호의 세기는 표적마다 다르게 설계되어 있다. 이러한 특징은 표적 인식을 위해 사용되는 거리 프로파일(Range profile)을 통해서 명확히 확인할 수 있다.

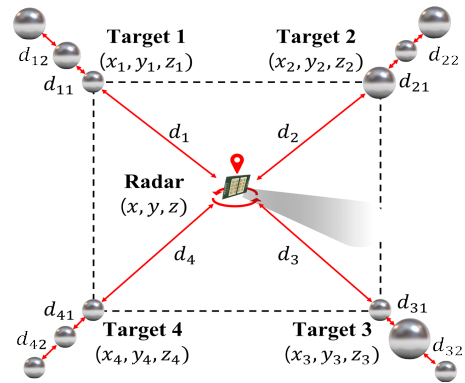


그림 1. 계단 주파수 레이더와 기준 표적 배치의 구성
Fig. 1. Configuration of stepped-frequency radar and reference target placement

2.1 거리 정보 추출 및 표적 인식

정확한 거리 정보 추출을 위해서 본 연구에서는 참고문헌 [3]에서와 마찬가지로 EP-based CLEAN 알고리즘을 적용하였다. 이 알고리즘은 수신된 거리 프로파일에서 산란점을 순차적으로 추출하고, 추출된 산란점 성분을 순차적으로 제거하는 과정을 반복해 각 산란점의 정확한 거리와 세기를 효과적으로 추정할 수 있다.

하지만, 추출된 거리 정보만으로는 그 거리 정보가 어떤 표적에 대한 거리 정보인지를 알 수 없기에 자기 위치 추정을 수행할 수 없게 된다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 CNN을 활용한 표적 인식 기법을 적용하였다. 먼저, 각 기준 표적으로부터 학습을 위한 거리 프로파일 영상을 획득하고 이를 이용하여 CNN을 학습시킨다. 각 표적은 산란점 간의 거리 차이 및 산란점 세기 차이와 같은 고유한 특징을 가지고 있어 학습이 가능하다. 따라서, 새롭게 획득된 미지의 거리 프로파일을 학습된 CNN 구분에 입력하면 어떤 기준 표적의 거리 프로파일 인지를 자동으로 인식할 수 있게 된다.

이러한 과정을 통해 획득한 거리-표적 짝짓기 결과는 다음 단계의 PSO 기반 자기 위치 추정 알고리즘의 핵심 입력값으로 사용된다.

2.2 PSO를 이용한 자기 위치 추정 방법

2.1절에서 설명한 과정을 통해 획득한 거리-표적 짝짓기 정보를 바탕으로, 레이더의 자기 위치를 추정하는 수학적 모델식은 식 (1)~(4)와 같다[3].

$$d_1^2 = (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 \quad (1)$$

$$d_2^2 = (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 \quad (2)$$

$$d_3^2 = (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 \quad (3)$$

$$d_4^2 = (x - x_4)^2 + (y - y_4)^2 + (z - z_4)^2 \quad (4)$$

식 (1)~(4)의 d_n 은 EP-based CLEAN 기법을 통해 획득한 레이더와 각 표적 간의 거리 값을 의미하고, [3]에서 자세히 기술된 계산과정을 통해 식 (5)와 같은 행렬식으로 나타낼 수 있다. 참고문헌 [3]에서는 식 (5)에 최소자승법을 적용하여 자기 위치를 추정하였다. 하지만, 본 논문에서는 LS의 계산 오차를 줄이기 위해 PSO 최적화를 이용하였으며, PSO 최적화에 사용된 비용함수는 식 (6)과 같이 정의하였다.

$$\mathbf{X}^* \mathbf{t} = \mathbf{b} \quad (5)$$

$$fitness = \|\mathbf{X}^* \mathbf{t} - \mathbf{b}\|^2 \quad (6)$$

식 (6)의 제곱합 형태의 목적함수는 음수 오차와 양수 오차가 상쇄되는 것을 방지하며, 오차의 크기를 명확히 표현할 수 있어 최적화 과정에 더 적합하다. 식 (5)와 (6)에서 행렬 $\mathbf{X}$ 는 기준 표적의 위치 좌표로 구성된 미리 알고 있는 행렬이며, $\mathbf{b}$ 는 각 기준 표적과의 거리 정보를 포함한 벡터로 이 또한 앞 절의 계산을 통해 알고 있는 값이다. $\mathbf{t}$ 는 추정하고자 하는 위치의 좌표를 나타내는 벡터이다.

$$L_i(t+1) = L_i(t) + v_i(t+1) \quad (7)$$

$$v_i(t+1) = wv_i(t) + c_1r_1(p_{i,best} - L_i(t)) + c_2r_2(g_{best} - L_i(t)) \quad (8)$$

PSO는 새 떼나 물고기 떼의 군집 행동을 기반으로 다수의 입자(개체)가 협력적으로 움직이며 해를

탐색하는 최적화 알고리즘이다. 각 입자의 위치를 식 (7)을 이용해 매 순간 업데이트하고, 식 (6)의 비용 함수를 최소화하는 방향으로 식 (8)을 이용해 입자의 속도를 조정해서 최종적으로 비용함수를 최소화하는 최적해를 찾아내게 된다. 식 (7)의 $L_i(t)$ 은 입자 i 의 위치, $v_i(t)$ 는 입자 i 의 속도를 의미한다. 식 (8)의 c_1, c_2 는 각각 인지 계수와 군집 계수, r_1, r_2 는 0부터 1 사이의 난수 그리고 w 는 관성 계수이다. $p_{i,best}$ 는 입자 i 의 개인 최적 위치, g_{best} 는 전체 군집의 전역 최적 위치를 의미한다.

III. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안하는 자기 위치 추정 알고리즘의 성능 평가를 위해 MATLAB 기반 시뮬레이션을 수행하였다. 알고리즘의 견고성과 정밀성을 다양한 환경에서 검증하기 위해, 세 가지 서로 다른 SNR (Signal-to-Noise Ratio) 조건에서 진행하였다. 총 27 개의 서로 다른 위치에 레이더를 배치하고, 각 SNR 조건 별로 100회씩 반복 실행하여, 총 8,100회의 시뮬레이션을 수행하였다. PSO에 사용되는 매개변수 값은 표 1에 정리되어 있다.

표 1. PSO의 매개변수 설정

Table 1. Parameter settings of PSO

Parameter	Value
Number of particles	500
Max iterations	100
Inertia weight (w)	0.7
Cognitive coefficient (c_1)	1
Social coefficient (c_2)	1

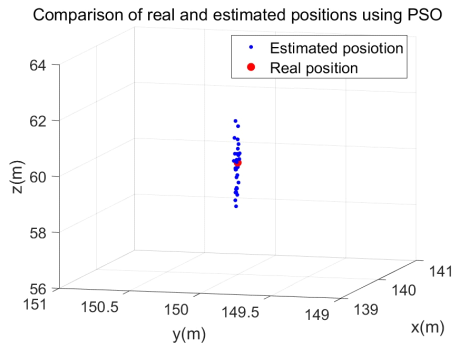
두 알고리즘의 성능 평가는 RMSE를 기반으로 하였으며, 비교 분석을 위해 LS 기반 위치 추정 기법과 제안된 PSO 기반 기법을 동일한 조건에서 비교하였다. 각 SNR 별로 산출된 RMSE 평균값의 결과는 표 2에 정리되어 있다. 본 연구의 목적함수는 위치 추정 과정에서 발생한 오차로 인해 non-convex 특성을 가지며, 이로 인해 LS는 local minimum에 민감하다. 반면 PSO는 전역 탐색 기반 알고리즘이므로 안정적으로 정확한 해를 도출한다.

표 2. SNR 별 위치 추정 RMSE 비교(LS vs. PSO)

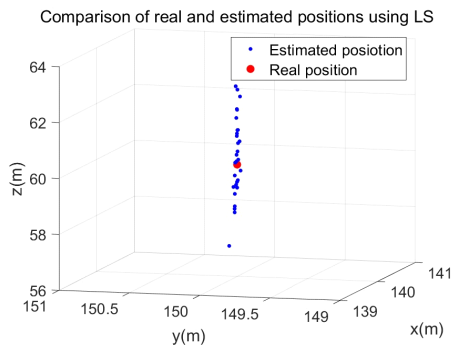
Table 2. Comparison of RMSE of position estimation for different SNR(LS vs. PSO)

SNR Method	5 dB	10 dB	15 dB
LS	1.2624 m	0.9254 m	0.7991 m
PSO	1.2156 m	0.8675 m	0.7639 m

그림 2는 좌표 (140, 150, 60)에 레이더를 위치시킨 후, LS와 PSO를 이용한 위치 추정 시뮬레이션 결과를 비교한 것이다. PSO 기법(그림 2(a))은 LS(그림 2(b))에 비해 z축 방향의 위치 추정 오차가 적은 것을 확인할 수 있다.



(a) PSO 기반 자기 위치 추정
(a) PSO-based self-position estimation



(b) LS 기반 자기 위치 추정
(b) LS-based self-position estimation

그림 2. PSO와 LS 기반 위치 추정 결과 비교
Fig. 2. Comparison of self-position estimation :
PSO vs. LS

IV. 결 론

본 논문에서는 계단 주파수 레이더를 이용해 획득한 데이터를 기반으로 PSO 최적화를 통한 자기 위치 추정 알고리즘을 제안하였다. 다양한 SNR 조

건에서 수행된 시뮬레이션을 통해, 제안된 PSO 기반 기법은 기존의 LS에 비해 일관되게 더 낮은 RMSE를 나타냈으며, 이는 더욱 정확한 자기 위치 추정이 가능함을 입증하였다. 본 논문에서는 성능 검증을 위해 시뮬레이션만 수행하였지만 향후 실험을 통하여 제안한 알고리즘의 우수성을 검증할 계획이다.

Acknowledgment

본 논문은 2025년도 한국정보기술학회 하계종합 학술대회에서 발표한 논문(GPS-denied 환경에서 PSO를 이용한 자기 위치 추정 기법)[5]을 확장한 것임.

References

- [1] H. Ma, et al., "Radar image-based positioning for USV under GPS denied environment", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 19, No. 1, pp. 72-80, Jan. 2018. <https://doi.org/10.1109/TITS.2017.2690577>.
- [2] J. H. Kim and K. K. Kim, "Vision-based Markerless Robot-to-robot Relative Pose Estimation Using RGB-D Data", Journal of Institute of Control, Robotics and System, Vol. 29, No. 6, Jun. 2023. <https://doi.org/10.5302/J.ICROS.2023.23.0030>.
- [3] I. S. Choi and J. H. Kim, "3D Self-positioning Method Using Stepped-Frequency Radar and MMSE Estimator", Proc. of Innovative Computing 2024, Taichung, Taiwan, Vol. 4, pp. 283-287, Jan. 2024. https://doi.org/10.1007/978-981-97-4182-3_36.
- [4] I. S. Choi and H. T. Kim, "One-dimensional evolutionary programming-based CLEAN", IEE Electronics Letters, Vol. 37, No. 6, pp. 400-401, Mar. 2001. <https://doi.org/10.1049/el:20010259>.
- [5] J. H. Kim, S. W. Oh, and I. S. Choi, "Self-Position Estimation Technique using PSO in GPS-denied Environment", Proc. of 2025 KIIT Summer Conference, Jeju, South Korea, pp. 88-89, Jun. 2025.