

빔합성 드론의 측위 정확도 향상을 위한 QCLS 기반 고도계 융합형 UWB 3차원 측위 시스템 성능 분석

전중화, 주형준, 박철순*, 나선필*, 권재욱**, 성태경***

한화시스템(주), *국방과학연구소, **주와이파이브, ***충남대학교

jonghwa.jeon@hanwha.com

Performance Analysis of QCLS-based Altimeter-Fused UWB 3D Positioning System for Improving the Positioning Accuracy of Beamforming Drones

Jonghwa Jeon, Hyungjoon Joo, *Cheolsun Park, *Sunphil Nah, **Jaewook Gwon, ***Taekyung Sung

Hanwha Systms, *Agency for Defense Development, **Wifive Co. Ltd., ***Chungnam National University

요 약

본 논문에서는 UWB(Ultra-Wideband) 거리 측정 기술과 고도계 센서를 융합하고, QCLS(Quadratic Correction Least Squares) 알고리즘을 적용한 3차원 위치 추정 시스템을 설계하였다. 기존 LS(Least Squares) 기반 측위 방식은 고도 정보의 정확도 부족으로 인해 드론기반 빔합성에 요구되는 정밀도에 도달하기 어렵다. 본 연구는 지상에 4개 앵커를 설치하고, 고도 100m 상공의 드론 위치를 시뮬레이션하여 QCLS 기반 보정 효과와 고도계 융합의 기여도를 분석하였다. 실험 결과, 제안하는 QCLS+고도계 융합형 측위 알고리즘 적용으로 Z축 오차가 약 24% 개선됨을 확인하였다.

I. 서론

분산형 빔합성은 복수의 기기에 분산되어 배치된 안테나들로 이루어진 균일 또는 비균일 안테나 배열을 이용하여 빔합성을 수행하는 기술로 복수의 기기가 협력하여 송수신 거리를 늘리거나 신호 대 잡음비를 향상시키는 것이 가능하다. 드론 기반 분산형 빔합성은 각 드론들에 장착된 안테나를 이용하여 분산형 빔 합성을 수행하는 방식으로, 공중에서 운용되어 장애물이 없는 넓은 가시거리 확보가 가능한 드론의 장점을 이용하여 감시거리를 늘리거나 향상된 신호 대 잡음비를 통해 저피탐 신호탐지에 활용될 수 있다[1]. 이러한 드론 기반 분산형 빔합성 시스템에서 드론의 제어에 위해 정밀한 위치 추정이 중요하다. 드론의 정밀 측위 및 제어를 위해 기존 연구는 대부분 GNSS-RTK(Global Navigation Satellite System-Real Time Kinematics) 또는 카메라 기반 영상 측위로 수행되었다. 하지만 기존 연구는 제빙이나 날씨의 영향을 많이 받는다는 문제가 있다. 이러한 문제 극복을 위해 UWB(Ultra Wide Band) 기반 정밀 측위 시스템을 많이 사용하는 추세이다[2]. 그러나 UWB 신호 기반의 거리 측정은 대부분의 위치 추정 알고리즘이 비선형 문제를 선형화한 LS(Least Squares) 방식에 의존하고 있으며, 이 방식은 특히 수직(Z축) 방향의 위치 정확도가 낮다는 문제가 있다.

본 연구에서는 이러한 문제를 개선하기 위해 QCLS(Quadratic Correction Least Squares) 기법을 적용하였다. QCLS는 비선형 거리 방정식의 2차 테일러 전개 항을 반영함으로써, 기존 LS 방식의 한계를 보완한다. 또한 Z축 보정의 신뢰성을 확보하기 위해, 고도계 센서를 통해 얻은 고도 정보를 융합함으로써 더 정밀한 3차원 위치 추정이 가능하도록 한다.

II. 본론

2.1 LS 기반 측위 알고리즘

일반적인 LS 알고리즘은 식 (1)과 같이 거리 기반 방정식으로 구성된다:

$$d_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \quad (1)$$

여기서 d_i 는 앵커 i 와 태그의 위치를 나타내며, 앵커 i 의 위치는

$P_i = [x_i, y_i, z_i]^T$, 태그의 위치는 $X = [x, y, z]^T$ 로 나타낸다.

LS 기반 측위 알고리즘은 위치 추정값 $\hat{X} = [\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}]^T$ 으로부터 거리 오차 $r_i = d_i^{\text{measured}} - d_i^{\text{estimated}}$ 를 계산하여 식 (2)와 같은 위치 추정값인 ΔX_{LS} 를 계산하여 이를 최소화하는 해를 구하는 방식이다.

$$\Delta X_{LS} = (H^T H)^{-1} H^T r \quad (2)$$

2.2 QCLS + 고도계 융합 알고리즘

QCLS는 위 LS 기반 결과에 2차 보정 항을 추가하여 다음 식 (3)과 같이 계산된다[3].

$$\Delta X_{QCLS} = \Delta X_{LS} + (H^T H)^{-1} \sum_i [-0.5 r_i H_i \Delta X] \quad (3)$$

여기서 H 는 자코비안, H_i 는 각 거리 방정식에 대한 헤시안 행렬이다. 이때 고도계 센서로부터 측정된 고도값 z_{alt} 는 식 (4)와 같이 측정 방정식으로 포함되며, Z축 추정에 큰 도움을 준다.

$$r_z = z_{alt} - z \quad (4)$$

식 (4)는 추정값과 측정값의 잔차로 정의한 것이며, 전체 잔차 벡터는 식 (5)와 같이 확장된다.

$$r = [r_1, r_2, \dots, r_N, r_z]^T \quad (5)$$

또한 자코비안 행렬 H 도 이에따라 N+1행을 가지며, 고도계에 해당하는 마지막 행은 다음과 같이 구성된다.

$$H_{N+1} = [0 \ 0 \ 1] \quad (6)$$

2.3 시뮬레이션 설정

QCLS 기반 고도계 융합 시스템의 측위 성능을 확인하기 위해 시뮬레이션 기반으로 검증하였다. 시뮬레이션을 위한 앵커 및 태그(드론)의 배치는 그림 1과 같이 100m 간격의 정사각형 구조로 지상에 배치된 4개의 UWB 앵커를 기준으로, 상공에 임의로 배치된 5개의 태그이다. 각 태그는 UWB로부터의 거리 측정값과 함께 고도계로부터의 고도 데이터를 제공하며, 이를 기반으로 LS와 QCLS+고도계 융합형 알고리즘을 각각 비교하였다.

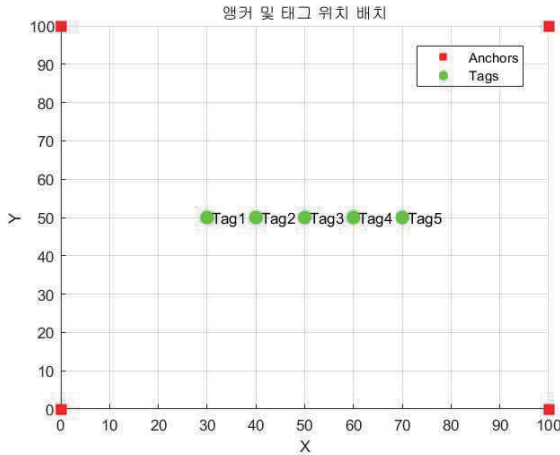


그림 1. 앵커 및 태그의 위치 배치

드론 배치 시 고도는 100m로 고정하였고, 앵커의 고도는 실제 시험을 고려하여 0.5~2m 사이에 0.5m 간격으로 배치하였다. 시뮬레이션 결과가 실제와 비슷하도록 UWB 거리측정치와 고도계 측정치에 각각 데이터시트를 참고하여 잡음을 포함하였다.

시뮬레이션 결과 LS 기반 측위시와 QCLS+고도계 기반 측위시의 Z축 오차(RMSE, Root Mean Square Error)는 그림 2, 표 1과 같다.

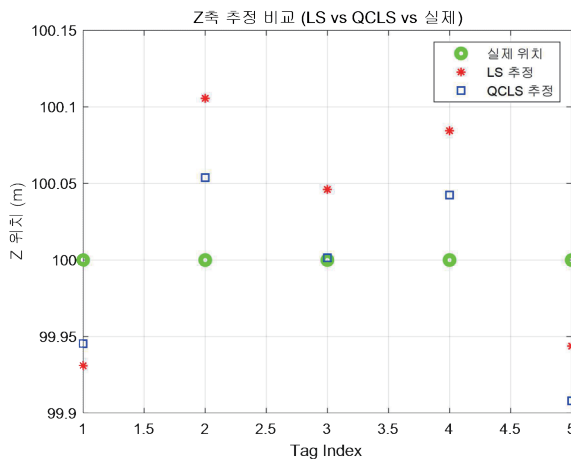


그림 2. Z축 추정 비교(실제위치, LS 추정, QCLS 추정)

표 1. 측위 시뮬레이션 비교 결과

측위 알고리즘	Z축 RMSE
LS 기반 측위 알고리즘	0.075m
QCLS+고도계 융합형 측위 알고리즘	0.057m

시뮬레이션 결과 QCLS+고도계 융합형 측위 알고리즘이 LS기반 측위 알고리즘보다 Z축 RMSE가 약 24% 개선됨을 알 수 있다.

III. 결론

본 연구에서는 UWB 거리 측정 기반 3차원 측위 시스템에 QCLS 알고리즘과 고도계 센서를 융합한 위치 추정 방식을 제안하였다. 기존 LS 기반 방식 대비 QCLS는 비선형성 보정을 통해 정확도를 크게 향상시켰고, 고도계의 Z축 정보 추가로 인해 Z축 오차가 효과적으로 감소하였다.

모의실험 결과, LS 기반 방식의 Z축 RMSE는 약 0.075m였으며, QCLS + 고도계 융합의 경우 0.057m로 약 24%의 정확도 향상을 보였다. 이는 QCLS 기반 측위 알고리즘에서 고도 보정과 2차 오차 보정이 Z축 측위 정밀도에 실질적인 기여했음을 시사한다.

향후 연구에서는 실제 시험을 통해 두 측위 알고리즘의 성능을 비교할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 정부(방위사업청)의 재원으로 미래도전국방기술과제(No. 915087201)를 통해 연구가 수행되었다.

참 고 문 헌

- [1] 김경민, 박철순, 나선필, 조성진, 장재원, 김선교, “기체 위치 오차에 따른 드론 기반 분산형 빔합성 성능 평가”, 2024년도 한국통신학회 하계 종합학술발표회, 2024
- [2] Sahinoglu Z., Gezici S. & Guvenc I., Ultra-wideband Positioning Systems Theoretical Limits, Ranging Algorithms, and Protocols, 2008, Cambridge University Press
- [3] 김동혁, 송승헌, 박경순, 성태경, “TDOA 측정치를 이용한 가중치 추정방식의 QCLS 측위 방법”, 대한전자공학회논문지, Vol. 44, Issue 4, pp. 1-7, 2007