

# IR-UWB 레이더 기반의 실내 위치 추정을 위한 클러터 환경에서 미약신호 검출 알고리즘

## A Weak Signal Detection Algorithm in Clutter Environment for Indoor Location Estimation based on IR-UWB Radar

윤영욱<sup>1</sup> · 손정우<sup>2</sup> · 김영익<sup>3\*</sup>

Younguk Yun<sup>1</sup>, Jung-woo Sohn<sup>2</sup>, Youngok Kim<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Assistant Professor, Department of Software, Yonsei University, Wonju, Republic of Korea

<sup>2</sup>Assistant Professor, Department of Software, Yonsei University, Wonju, Republic of Korea

<sup>3</sup>Professor, Department of Electronic Engineering, Kwangwoon University, Seoul, Republic of Korea

\*Corresponding author: Youngok Kim, kimyoungok@kw.ac.kr

### ABSTRACT

**Purpose:** In this paper, a distance estimation technique for indoor location estimation using IR-UWB is proposed and researched. We propose an algorithm that can increase the SNR lowered due to clutter or noise in an indoor environment. **Method:** In order to clutter suppression and detect weak signals, we analyze the existing studies of background remover, correlation, and singular vector decomposition techniques and propose an algorithm. **Result:** The proposed algorithm, the average error was 0.57m up to 11.5m, and the error were 0.49m from 6m to 11.5m. the average error rate was reduced by about 1m compared to the previous study. **Conclusion:** It can be used as a technique for detecting weak signals in clutter and noise environments for distance or location estimation, and can also be used as a human life detection technique to reduce damage to people in a disaster situation by using UWB radar which has highly transparent.

**Keywords:** Distance Estimation, Positioning, RADAR, UWB, Weak Signal Detection

### 요약

**연구목적:** 본 논문에서는 IR-UWB를 활용하여 실내 위치 추정을 위한 거리 추정 기술을 제안하고 연구 수행한다. 실내 환경에서 clutter(클러터)나 noise(노이즈) 환경으로 인해 낮아진 목표 신호의 검출과 세기를 높일 수 있는 알고리즘을 제안한다. **연구방법:** 클러터 억제와 미약 신호를 검출하기 위해 기존 연구인 Background Remover, Correlation, Singular Vector Decomposition 연구를 분석하고 알고리즘을 제안한다. 알고리즘의 평가를 위해 일반 실내 건물에서 2~11.5m 까지 목표물을 측정하는 실험을 진행하고 평균 에러율을 통해 성능평가 및 검증을 진행한다. **연구결과:** 제안하는 알고리즘을 통해 11.5m까지 평균에러 0.57m, 6m이상에서 11.5m까지 에러율 0.49m였다. 기존 연구 대비하여 평균 에러율 약 1m를 줄이는 결과를 보였다. **결론:** 본 연구에서 제안하는 알고리즘을 실험을 통해 검증했다. 거리나 위치 추정을 위한 클러터, 노이즈 환경에서 미약 신호 검출하는 기법으로 활용이 가능할 뿐 아니라 투과성이 높은 UWB 레이더를 활용하여 재난 상황에서 인명을 피해를 줄이기 위한 인명 검출 기법으로 활용될 수 있다.

**핵심용어:** 거리추정, 위치추적, 레이더, UWB, 미약신호검출

Received | 4 October, 2022

Revised | 22 March, 2023

Accepted | 23 March, 2023

 OPEN ACCESS



This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in anymedium, provided the original work is properly cited.

© Society of Disaster Information All rights reserved.

## 서론

최근 재난/사고 시 신속 대응을 위한 기술로, On-demand, 배달 애플리케이션 등 여러 산업 분야에서 위치 추적 기술의 필요성이 증가하고 있다. 실내에서 위치 추정을 위한 기술로 관성센서(inertial measurement unit)를 활용하는 pedestrian dead-reckoning(PDR)기술 그리고 camera를 활용한 vision 기술 등 다양한 센서(sensor)를 활용한 기술 개발이 이뤄지고 있지만 센서 민감도 차이로 인한 위치정확도 악화, 회피 목적으로 고의적 위치 추적 차단, 유지보수의 어려움, 사생활 침해 등 이유로 실내 위치 추정 기술로 도입되기에 많은 제약이 있을 수 있다. 앞서 언급한 단점을 보완할 수 있는 기술로 초광대역 레이더(impulse RADAR ultra wide-band, IR-UWB)를 활용한 연구가 진행되고 있다(Kagawa et al., 2014; Wang et al., 2011). 그러나 IR-UWB는 높은 시간 분해능을 제공할 수 있음에도 불구하고 그 적용 범위가 매우 제한적이라는 단점이 있다(De Angelis et al., 2016). 또한 페이딩 효과(fading effect)로 인해 실내 환경에서 클러터(clutter)에 의해 왜곡되는 직접 경로의 도착 시간(ToA)을 추정하기 어렵기에 가용 측정 범위(coverage)가 제한된다(Luo et al., 2012; Meissner et al., 2014). 페이딩 효과란 전파의 반사, 산란 등으로 인해 신호(desired signal)의 강도가 감소하는 현상을 말하고 클러터란 신호가 지면, 바다, 물체 등 방해로 인해 불필요한 에코(echo)가 발생하는 것을 의미한다.

실내 무선 채널 환경에서 발생하는 클러터 신호는 목표물(target)에서 반사되는 신호와 합쳐지게 된다. 따라서 수신기 측에서 수신된 신호는 대상에 의해 반사된 신호와 환경에서 발생하는 클러터와 혼합 신호로 간주할 수 있다. 목표로 하는 곳의 신호를 잘 추적하기 위해 이러한 클러터 신호를 제거해야 한다. 클러터 신호를 제거하는 방법은 여러 가지 방법이 있지만 기존 연구 방식은 일반적으로 상관관계(correlation)와 배경 제거(background removal) 방식으로 나눌 수 있다. 상관관계를 활용한 방식은 미리 수집된 기준 신호 파형과 수신되는 기준 파형의 상관관계를 비교하여 상관 계수가 높은 신호를 검출 대상으로 결정하는 기법이다. 이러한 상관관계를 활용한 방식의 한계는 목표물과 레이더 간 거리가 증가함에 따라 표적에서 반사되는 신호의 세기가 크게 감소하여 성능저하가 일어난다는 것이다. 성능 향상을 위해 목표물의 크기, 모양, 매체에 해당하는 신호 파형을 사전에 준비하여 사용하는 연구 방법이 있다(Fuhrmann et al., 2008). 하지만 앞서 언급한 기법도 클러터 신호의 에너지가 상대적으로 크기 때문에 목표물을 정확하게 탐지해내기 어려운 한계가 있다.

기존의 배경 제거 기법은 target(타겟) 신호가 없는 환경에서 신호를 사전에 수집한다. 이 과정에서 클러터 신호를 분석할 수 있다. 목표물을 추정하는 단계에서는 사전에 수집된 배경 신호 파일을 차감하여 목표물 신호를 부각해 신호를 감지하는 연구 기법이다. 이 기법은 많은 클러터 데이터를 수집하고 분석해 성능 향상을 기대할 수 있지만, 이 기법 역시 목표물과 레이더 간 거리가 증가함에 따라 표적에서 반사되는 신호의 세기가 크게 감소하여 성능이 저하한다는 것이다(Guo et al., 2013; Tivive et al., 2014; Pettersson et al., 2015). 따라서 기존에 사용되던 신호 검출 기법은 실내 공간에서 원거리 표적에 대한 거리를 정확하게 추정하는 데 어려움이 있을 수 있다.

한편, 영상 신호 처리 기법으로 주요 사용되었던 singular value decomposition(SVD) 기법을 활용하여 레이더 신호를 검출하는 연구가 있었다(Lee et al., 2008). SVD는 인공지능 연구와 관련 있는 머신러닝(machine learning)이나 딥러닝(deep learning) 그리고 영상처리 분야에서 널리 활용되고 있다. 이 알고리즘(algorithm)은 행렬의 차원을 줄일 수 있고 스칼라(scalar) 값을 갖는 특이값(singular value)만으로 값을 재구성할 수 있다는 장점이 있다(Scharf, 1991). 이렇게 행렬의 차원(dimension)을 낮추면 컴퓨팅 연산량을 크게 낮출 수 있기에 계산 비용(cost), 프로그램 부하 및 시간 지연을 크게 줄일 수 있다. 레이더에서 신호 검출용으로 SVD를 활용한다면 수신 신호의 편차가 큰 경우 이 알고리즘을 사용하여 주요 클러터 신호

성분을 특이값으로 추출할 수 있다. 이 특이값은 다차원 행렬을 분해하여 얻을 수 있고 수신된 신호는 다차원 행렬로 표현될 수 있다. 주성분(principal component)을 추출하고 차원을 줄이기 위해 SVD에서 낮은 순위(low-rank)의 특이값을 선택하고 선택된 성분으로 행렬을 재구성할 수 있다(Kirsteins et al., 1994).

레이더 기반 위치 추정 및 추적 성능을 향상을 위해 신호 대 잡음비(SNR)를 높여야 하는데 잡음과 클러터 신호를 줄이기 위해 음성, 초음파, 레이더와 같은 신호처리의 다양한 분야에서 배경 제거, 교차 상관 및 SVD 기술이 사용되고 있다. 본 논문에서는 클러터 신호의 영향을 완화하여 장거리 표적을 탐지하기 위해 IR-UWB 레이더를 이용한 거리 추정 기법을 제안한다.

## 연구 이론과 시스템 설명

### RADAR system과 데이터 수집

실험을 위해 ‘N’사의 단일 CMOS 레이더 칩(chip)과 렌즈가 결합한 형태의 sinuous 안테나(antenna)가 있는 IR-UWB 레이더를 사용하였다. Fig. 1은 실험에 사용된 레이더를 보여준다. 전송 대역폭(transmit bandwidth)은 -10dB, 구동 전압과 소비전력은 5-volt, 113mW이며 universal serial bus(USB)로 동작, 통신이 가능한 소형 레이더이다. 이 레이더에서 출력되는 중심 주파수는 7.8GHz이고 대역폭은 2.50GHz이다. 펄스(pulse)를 초로 환산하면 나노초 이하(sub-nanosecond)에 해당한다.

레이더는 프레임 오프셋(frame offset)을 시작점으로 임펄스 신호(impulse signals)를 수신하면서 프레임 오프셋만큼 시간 지연을 두고 측정이 되기 때문에 해당 지점의 샘플러의 amplitude 값으로 목표물까지 거리를 추정할 수 있다. 이 레이더 시스템에서 거리를 구하는 방식은 레이더 프레임과 레이더의 시간 지연 관계를 역산하여 구할 수 있다. 1m 당 256개의 샘플러로 구성되고 샘플러 간의 시간 지연은 약 27ps이다. 이 값과 빛의 속도를 이용하면 레이더의 최대 분해능을 구할 수 있다. 레이더의 최대 분해능을 Dis라고 할 때 sampler Dis는 식 (1)과 같다. 송신된 펄스는 목표물에서 반사되어 수신기에서 수신되기 때문에 최종적으로 2로 나누어 줄 수 있다. 결과적으로 사용된 레이더의 최대 측정 해상도는 약 4mm이다.

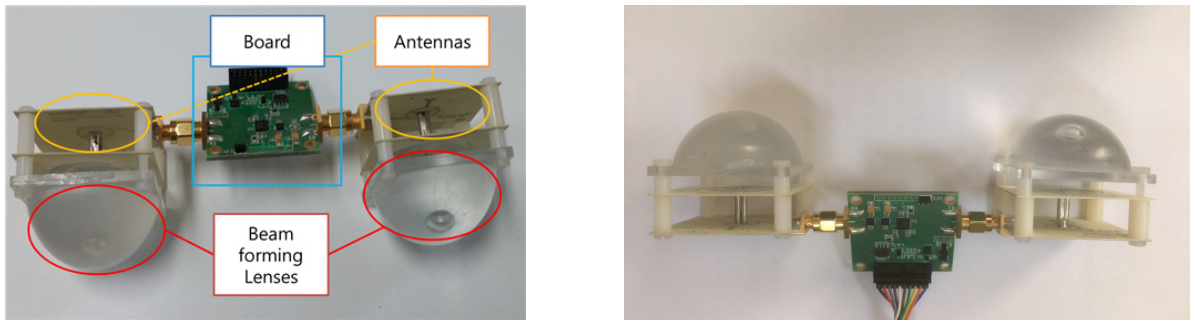


Fig. 1. The radar board and antenna

$$Dis = \frac{\tau_d \times c}{2} \approx 4(mm). \tag{1}$$

여기서,  $\tau_d$ : 데이터간 시간 지연, 27ps

$$c: 3 \times 108(m/s)$$

측정된 데이터는  $M \times N$  행렬 형식으로 저장되고  $M$ 은 시간이 지남에 따라 누적되는 데이터의 시간순서다.  $N$ 은 거리 데이터의 인덱스 번호(index)를 나타내며, 앞 절에서 언급한 바와 같이  $1m$  당  $N(=256)$ 개의 데이터가 수집되는데 0부터 256번까지 인덱스 번호는 0부터  $1m$ 까지를 의미한다면 2560번째 인덱스 번호는  $10m$ 를 의미하게 된다. 이 번호를 활용하여 목표물의 위치 데이터를 추정할 수 있다.

레이더를 활용하여 거리 값을 추정할 때 반사되는 수신 신호 값이 가장 큰 지점의 인덱스 값을 다시 거리 값으로 변환하여 위치 정보를 추정하는 방식을 사용한다. 본 연구에서 활용되는 레이더의 사진은 다음과 같다(Yun et al., 2020).

## Proposed Scheme

미약 신호(weak signal)를 검출하기 위해 서론에서 다양한 신호처리 기법을 살펴보았다. 본 논문에서는 상관관계, 배경 제거, 특이값 분해를 활용한 LRA 알고리즘(Kirsteins et al., 1994)과 새로운 기법을 조합해 미약 신호 검출 성능을 개선하는 알고리즘을 제안한다(Fuhrmann et al., 2008; Guo et al., 2013; Kirsteins et al., 1994).

신호처리 과정에서 두 가지의 가정을 한다. 첫 번째는 레이더 가동 시 목표물이 없는 상태이며 두 번째는 목표물 신호가 레이더로부터 멀어지는 상태이다. 첫 번째 가정을 통해 목표물이 없는 주변 환경에 대한 레이더 신호를 습득할 수 있다. 이때 습득한 환경 데이터를 배경 제거 신호처리 방법에 활용된다. 다음 두 번째 가정을 통해 목표물 신호 파형 습득할 수 있다. 일반적으로 측정 거리가 증가함에 따라 SNR 낮아지게 되어 목표물을 감지하기 어렵다. 가까운 거리에서 목표물이 감지되기 시작할 때 SNR 높은 상태의 신호 파형 습득할 수 있는데 이 신호의 일부를 추출하여 상관관계에서 활용할 참조 신호(reference target signal)로 사용한다.

신호처리의 과정은 Fig. 2과 같다. 그림에서 Start는 레이더 가동 단계를 의미하고 End는 신호처리가 끝난 것을 의미한다. 레이더 가동 시 위에서 언급한 첫 번째 가정으로 환경 데이터를 습득한다. 레이더를 통해 1차원의 데이터를 수집할 수 있는데 시간에 따른 데이터를 누적하면 2차원의 데이터로 만들고 활용할 수 있다. 이렇게 2차원 데이터를 SVD를 활용하여 주성분을 추출하면 레이더 신호의 주성분 데이터 파형을 추정할 수 있다. 주성분 파형을 law 데이터 신호에서 차감해주면 클러터 데이터 신호를 추출할 수 있다. Fig. 3은 LRA 알고리즘을 설명한 그림이다. 이 기법을 활용해 배경 제거를 위한 주 clutter 성분을 신호를 추출 한다.

목표물이 레이더로 검출되기 시작하는 시점, 두 번째 언급한 가정과 같이 목표물이 레이더에 가까운 상태가 되면 목표물 신호와 환경 신호가 혼재된 신호의 데이터를 추출한다. 이렇게 두 데이터 준비한 상태에서 앞서 언급한 신호처리 기법을 활용하여 미약 신호를 검출한다.

목표물이 있는 상태에서 측정되는 데이터는 목표물 신호와 환경 신호가 혼재된 신호라고 할 수 있다. 이 신호를 LRA를 통해 얻은 데이터로 차감한다. LRA를 통해 얻은 데이터는 환경 신호의 주 클러터 신호 성분으로 볼 수 있는데 차감된 데이터는 SNR을 낮추는 신호인 실험 환경의 클러터 성분을 크게 제거한 형태가 된다.

다음으로 목표물로 간주한 신호 파형을 상관 연산을 수행한다. 결과 값은 목표물과 가장 연관이 있을 것으로 간주되는 지점에서 높은 값을 갖게 된다. 이 결과 값을 다시 LRA 연산을 수행한다. 이 연산을 수행함으로써 오차를 발생시킬 수 있는 이상

치 또는 노이즈 성분을 줄일 수 있다.

다음으로는 이상치(outlier)를 낮추기 위한 방법으로 이동 평균 알고리즘을 적용한다. 최종적으로 강도가 가장 높은 데이터의 index 값을 위치 값으로 변환하여 목표물의 거리를 추정한다.

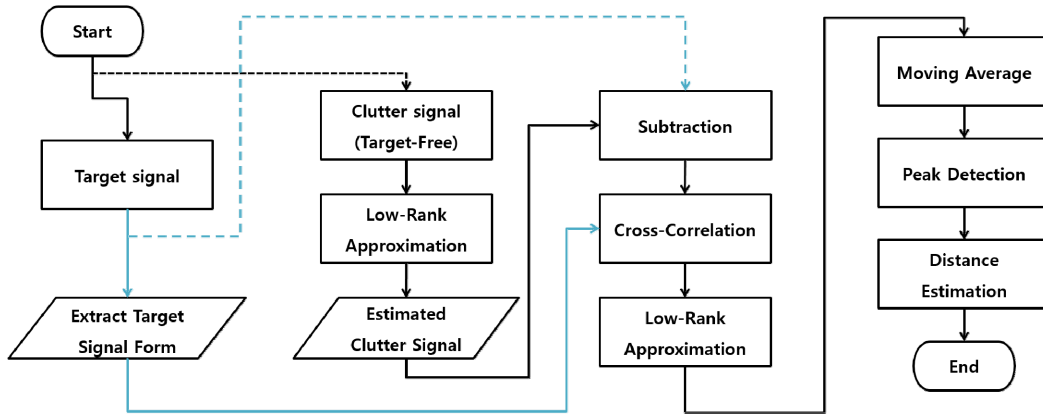


Fig. 2. Proposed algorithm

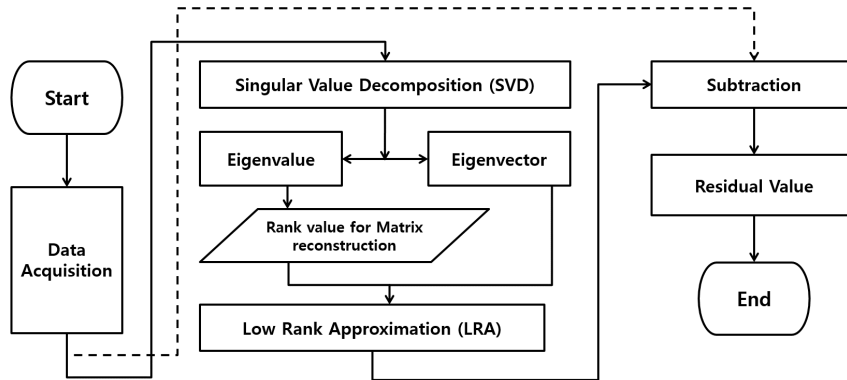


Fig. 3. Low rank approximation technique using singular value decomposition

## 실험방법 및 결과

### 실험 방법

실험은 Fig. 4(a)와 같이 일반 사무 건물에서 넓이는 약  $15m \times 8m$ , 높이는 약  $2.5m$  인 공간에서 수행했다. Fig. 4(b) 그림은 실험 공간에서 클러터 신호다. Fig. 4(a)에서 빨간색으로 표시된 곳이 철제 소화전이 설치된 위치다. 레이더 정상 매질에 따라 반사 신호의 수신 세기가 달라질 수 있는데 레이더로부터  $9m$  부근에 설치되어있는 소화전이 철제로 되어있어 클러터 신호가 크게 수신되고 있다. 제안하는 알고리즘을 적용하여 클러터 신호를 제거하고 목표 신호를 검출하는 작업을 수행하였다.

공간의 제약 상  $3m$ 에서  $11m$ 까지 목표물은 레이더로부터 일정 시간 정지와 이동을 반복하면서 구간을 왕복한다. 제안하



는 성능평가를 위해 약 30번의 반복 실험하고 평균 결과 값을 통해 성능 분석을 진행한다. 목표물은 사람으로 키는 172cm, 이동속도는 약 0.5m/s다. 이보다 정확한 분석을 위해 이동 시 실제 거리를 레이저 거리 측정기를 사용하여 측정하였다. 레이저 측정기의 오차는 약  $\pm 1mm$  수준이다. 제안하는 기법과 이전 연구 및 기법을 사용한 위치 추정기법의 성능 비교는 root mean square error(RMSE)를 사용했다.

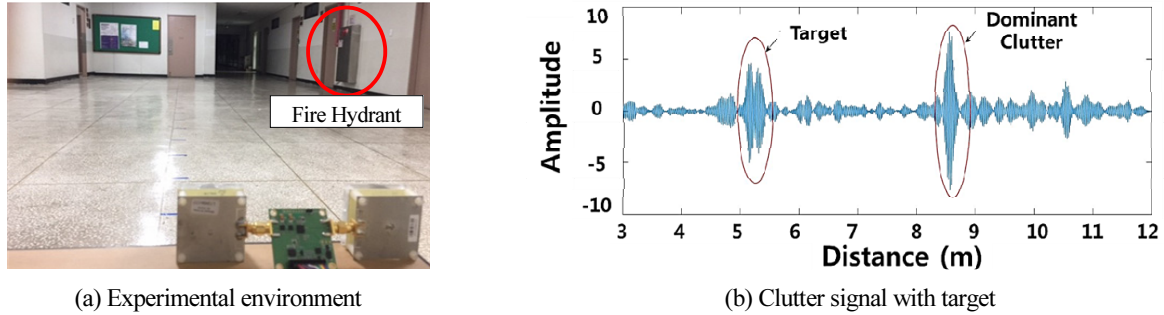


Fig. 4. Experimental environment

### 실험결과

본 논문은 알고리즘을 제안하고 실험을 통해 가능성을 확인해보는 것에 초점을 맞추고 있다. Fig. 5와 Table 1는 실험 결과를 보여준다. Fig. 5(a)는 기존 연구 기법을 활용한 거리에서 평균 에러를 보여주고 Fig. 5(b) 11.5m 거리에서 목표물 신호가 검출되는 신호 파형이다. 실험 결과는 2m 이상 거리의 결과만 값을 표시하였다. 2m 이하 거리에서는 레이더 시스템상 데이터 수집이 불가능하기 때문에 2m 이상 거리부터 실험을 수행했다.

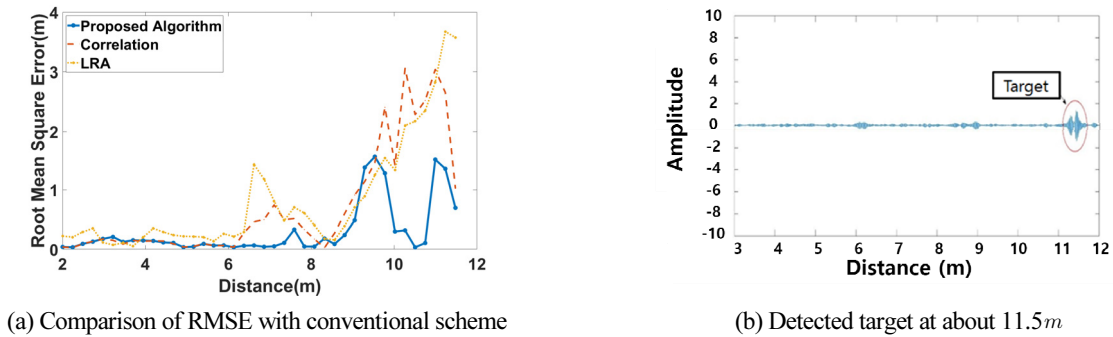


Fig. 5. Experimental result

Table 1. Comparison of the performance between the proposed scheme and conventional scheme

Scheme(Algorithm)	Correlation	LRA(Background Removal)	Proposed Scheme(algorithm)
Total Average error(m)	0.93	0.74	0.57
Average error 6 to 11.5(m)	1.24	1.37	0.49

결과 분석을 위한 추정 에러로 단위를 meter( $m$ )로 하는 root mean square error(RMSE)를 사용했다. 실험 결과 그래프에서 보여지 것과 같이 의미 있는 부분에서 평균 에러를 구하기 위해  $6m$  이상에서 에러를 평균 내어 결과 값 분석 결과로 활용했다. 실험에서 Proposed scheme(algorithm)은 본 논문에서 제안하는 알고리즘이고 LRA(Background Removal)는 클러스터 신호를 SVD 알고리즘을 활용하여 신호를 분해하고 일부 데이터를 목표물 데이터에서 값을 차감하는 방식의 알고리즘을 의미하고 Correlation은 LRA의 결과에서 습득한 목표물 신호 파형을 활용하여 상관 결과를 구한 것이다. 두 알고리즘은 기존 연구 방식에서 활용된 알고리즘 기법으로 볼 수 있다. 배경 제거 알고리즘만 활용한 결과는 성능 분석을 하는 것이 의미가 없을 정도로 성능이 좋지 않기에 표에서 제외 되었다. 전체평균 에러는 제안 기법 0.57, LRA 0.74, correlation 0.93을 보였고  $6m$  이상에서 최대거리까지는 제안 기법 0.49, LRA 1.37, correlation 1.24를 보였다. 제안하는 알고리즘의 RMSE는 0.49로 기존 기법 대비하여 약  $0.8m$ 의 에러를 줄였다.

## 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 IR-UWB 레이더를 활용하여 클러스터 환경에서 실내 위치 추정을 위한 알고리즘을 제안하고 실험을 통해 성능을 검증하였다. 일반적으로 UWB 레이더는 넓은 주파수 대역을 사용함으로 높은 해상도를 갖는 레이더이다. 본 연구에서는 사용된 IR-UWB 레이더는 출력의 제한이 있는 저전력, 저출력 장치이다. 따라서 가까운 거리에서는 높은 해상도를 갖고 있어 높은 신뢰성을 확보할 수 있지만 거리가 증가함에 따라 신호 감쇠가 크게 되는 단점도 갖고 있다.

제안하는 알고리즘을 활용하여  $11.5m$ 에서도 목표물을 잘 검출을 할 수 있었다. 측정된 거리는 연구 장소의 최대거리로 본 논문은 알고리즘을 제안하는 초기 연구로서 알고리즘에 대한 가능성을 확인해보았다. 향후 연구에서는 개방된 공간 외에 복잡한 공간에서 시험을 통해 문제점들을 개선하는 방식의 연구도 진행하고자 한다. 또한 결과와 같이 최대거리에서도 목표물을 잘 검출할 수 있었는데 최대 측정 가능 거리를 확인하기 위한 연구도 수행하고자 한다. 이 외에도 상관관계 신호에 대한 분석, 클러스터 분석을 계속해 성능을 높이는 연구를 진행하고자 한다.

본 논문에서 제안하는 기술을 통해 미약 신호 검출에서 사용될 수 있을 뿐만 아니라 레이더를 활용한 실내 위치 추적, 재난 상황에서 인명구조를 위해 사용될 수 있을 것이다.

## References

- [1] De Angelis, G., Moschitta, A., Carbone, P. (2016). "Positioning techniques in indoor environments based on stochastic modeling of UWB round-trip-time measurements." IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 17, No. 8, pp. 2272-2281.
- [2] Fuhrmann, D.R., San Antonio, G. (2008). "Transmit beamforming for MIMO radar systems using signal cross-correlation." IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 44, No. 1, pp. 171-186.
- [3] Guo, J.M., Hsia, C.H., Liu, Y.F., Shih, M.H., Chang, C.H., Wu, J.Y. (2013). "Fast background subtraction based on a multilayer codebook model for moving object detection." IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, Vol. 23, No. 10, pp. 1809-1821.
- [4] Kagawa, T., Li, H.B., Miura, R. (2014). "A UWB navigation system aided by sensor-based autonomous algorithm-Deployment and experiment in shopping mall." 2014 International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, Sydney, NSW, Australia, pp. 613-617.

- [5] KIRSTEINS, I.P., TUFTS, D.W. (1994). "Adaptive detection using low rank approximation to a data matrix." *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 30, No. 1, pp. 55-67.
- [6] LEE, K.C., OU, J.S., FANG, M.C. (2008). "Application of SVD noise-reduction technique to PCA based radar target recognition." *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. 81, pp. 447-459.
- [7] LUO, Y., LAW, C.L. (2012). "Indoor positioning using UWB-IR signals in the presence of dense multipath with path overlapping." *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 11, No. 10, pp. 3734-3743.
- [8] MEISSNER, P., LEITINGER, E., WITRISAL, K. (2014). "UWB for robust indoor tracking: Weighting of multipath components for efficient estimation." *IEEE Wireless Communications Letters*, Vol. 3, No. 5, pp. 501-504.
- [9] PETTERSSON, M.I., SJOGREN, T.K., VU, V.T. (2015). "Performance of moving target parameter estimation using SAR." *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 51, No. 2, pp. 1191-1202.
- [10] SCHARF, L.L. (1991). "The SVD and reduced rank signal processing." *Signal Processing*, Vol. 25, No. 2, pp. 113-133.
- [11] TIVIVE, F.H.C., BOUZERDOUM, A., AMIN, M.G. (2014). "A subspace projection approach for wall clutter mitigation in through-the-wall radar imaging." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 53, No. 4, pp. 2108-2122.
- [12] WANG, X., PHILIPS, K., ZHOU, C., BUSZE, B., PFLUG, H., YOUNG, A., DE GROOT, H. (2011). "A high-band IR-UWB chipset for real-time duty-cycled communication and localization systems." *IEEE Asian Solid-State Circuits Conference 2011, Jeju, Korea (South)*, pp. 381-384.
- [13] YUN, Y., LEE, J., KIM, J., KIM, Y. (2020). "Detection scheme of heart and respiration signals for a driver of car with a doppler radar." *Journal of the Society of Disaster Information*, Vol. 16, No. 1, pp. 87-95.