

다중빔 방식의 FMCW 레이더 표적신호 시뮬레이터 개발

Development of Target Signal Simulator for Multi-Beam Type FMCW Radar

이 승 연* 최 덕 선* 정 영 현* 이 석 재** 윤 주 흥*

Seung-Youn Lee Tok-Son Choe Young-Hun Jung Seok-Jae Lee Joo-Hong Yoon

Abstract

To detect targets for autonomous navigation of unmanned ground vehicle, mounted sensors are required to work all-weather condition. In this point of view, the FMCW radar is quietly appropriate. In this paper, we present development results of target signal simulator for multi-beam type FMCW radar. A target signal simulator make pseudo target signals which simulates multiple moving targets. And we describe how to make hit information for each target in multi-beam type radar. The developed methods are utilized for target tracking device. Moreover it can be applied to similar target signal simulator.

Keywords : FMCW Radar, Target Simulator, Signal Processing, Plot Generation

1. 서 론

최근 무인자율차량의 연구개발이 진행됨에 따라 차량 전방의 이동물체를 미리 파악하고 회피하기 위한 센서 연구가 활발히 진행되고 있다. 이를 위한 감지센서는 최대탐지거리, 물체 판별, 비용등을 고려하여 각 특징에 맞는 센서를 선택하여 사용하게 된다. 이러한 센서들 가운데 FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave : 주파수 변조 정현파) 기술은 신호대 잡음비가 다른 방식에 비해 우수하며, 주파수 영역의 해석을 통해 다수의 이동물체에 대한 거리정보를 얻을 수 있고, 특히 환경의 변화에 덜 민감하여 전천후 주야에도 운

용이 가능해 선진국을 중심으로 많은 연구개발이 진행되어 왔다. 또한 FMCW 방식은 선형적으로 주파수가 변하는 FM 신호를 송신하여 이동물체로부터 반사되는 수신 신호와의 주파수 차로부터 거리정보를 얻는 비교적 간단한 방식으로 구현이 가능하여 소형 경량화 할 수 있다^[1~3].

이러한 FMCW레이더는 지금까지 일반 상용자동차에 장착되어 지능형 순항조정(Auto Cruise Control)에 사용되거나 차량간 충돌방지에 활용되어 왔으며, 주로 76GHz에서 77GHz 대역의 주파수를 사용하고, 탐지거리, 방위각 및 스캔 속도 등은 레이더의 하드웨어 특성별로 매우 다양하다.

한편 야지에서 주행하는 무인차량에 장착되어 사용되는 FMCW레이더는 비교적 근거리에 넓은 방위각을 가지도록 설계되어야 하며, 대상물체의 탐지 및 추적이 가능하여야 하므로 높은 스캔 속도를 요구한다.

이러한 요구성능을 만족하기 위해 1개의 송신 안테

† 2012년 2월 24일 접수~2012년 5월 4일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

** 대구보건대학교

책임저자 : 이승연(lee_sy@add.re.kr)

나와 8개의 수신 안테나를 가지는 다중빔 방식을 사용함으로써 넓은 방위각과 높은 스캔 속도를 가질 수 있도록 레이더를 설계하였다. 이에 대한 기능블록도를 Fig. 1에 제시하였다.

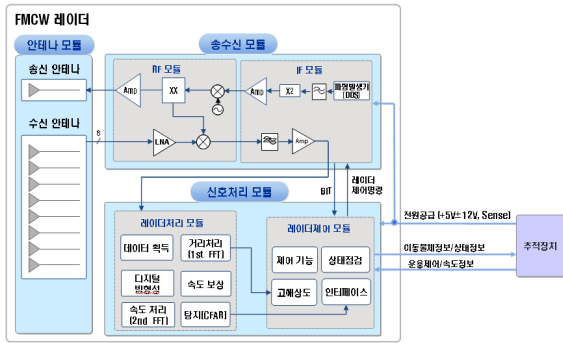


Fig. 1. Block diagram of FMCW radar system

Fig. 1에서 보듯이 FMCW 레이더 시스템은 크게 FMCW레이더와 추적장치로 구성되어 있으며, FMCW 레이더는 안테나 모듈과 송수신 모듈, 그리고 신호처리 모듈로 구성되며, 추적장치와 연동되어 운용한다. 추적장치는 FMCW레이더로 운용제어명령과 속도정보를 전송하고, 전원을 공급한다. FMCW 레이더는 이동 물체의 탐지정보(Hit) 및 레이더 자체의 상태정보를 전송하게 된다.

이러한 탐지정보를 수신한 추적장치는 Fig. 2와 같이 탐지처리 과정, 추적과정, 운용통제 과정을 거쳐 표적추적을 수행하게 된다.

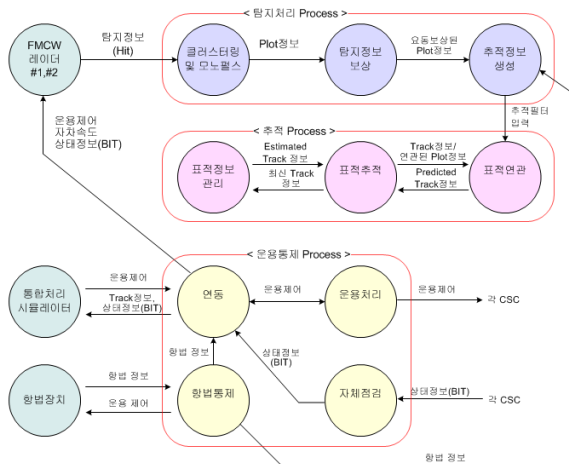


Fig. 2. Process of target tracking

상기 다중빔 방식의 FMCW 레이더기반 표적추적장치를 개발함에 있어 레이더에서 들어오는 표적신호를 미리 모사하고 이를 바탕으로 추적장치의 알고리즘을 개발하면, 알고리즘의 보안점을 사전에 도출하고 개발할 수 있어 사업의 기간 단축 및 비용절감에 큰 효과를 가진다.

본 논문에서는 다중빔 방식의 FMCW레이더로부터 들어오는 Hit를 모사하기 위해 개발한 시뮬레이터를 기술하였으며, 이를 검증하기 위한 과정을 기술하였다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 레이더로부터 수신되는 탐지정보 모사기법에 대해서 기술하고, 3장에서는 시뮬레이션 결과를 기술한다. 끝으로 4장에서는 본 논문의 의의와 향후 연구 방향에 대해서 논한다.

2. 표적신호 시뮬레이터

가. 개요

레이더로부터 수신되는 표적신호를 모사하기 위해서 표적신호 시뮬레이터를 제작하였다. 표적신호 시뮬레이터는 가상의 FMCW레이더 역할을 함과 동시에 다중 표적 모사기능을 가져야 한다. 이를 위해 2D/3D 가상 환경 생성을 위해 DEM(Digital Elevation Map)을 사용하였으며, 시점조절기능과 지도확대/축소 기능을 가지도록 구현하였다. 또한 차량 6대 및 사람 6명의 이동경로, 속도 설정이 가능하고, 자차의 이동경로, 속도 및 차량에서 레이더 장착 위치까지 설정할 수 있도록 구현하였다. 또한 다중빔 방식의 FMCW레이더의 표적의 탐지정보 및 클러스터 탐지정보를 모의하는 기능을 가지도록 구현하였다. Table 1은 식별된 시뮬레이터 항목이며, Fig. 3은 구현된 표적신호 시뮬레이터 화면이다.

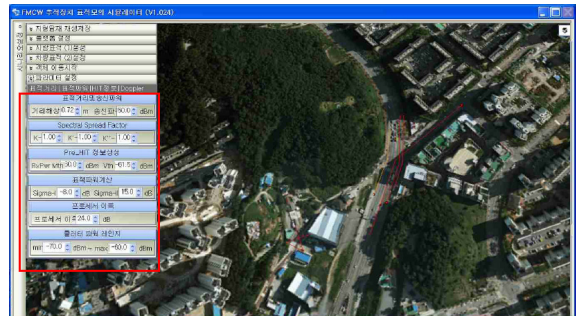


Fig. 3. Display of target signal simulator

Table 1. Function analysis of target signal simulator

기능	구현 내용
2D/3D 가상환경 생성기능	<ul style="list-style-type: none"> • 디지털 고도맵(DEM) 전시 • 시점(ViewPoint) 조절 • 확대/축소 기능
차량 주행 모의기능	<ul style="list-style-type: none"> • 이동 경로 설정 기능 • 속도 설정 기능
이동장애물 모의기능	<ul style="list-style-type: none"> • 이동장애물의 종류, 경로, 속도 설정 기능
항법정보 모의기능	<ul style="list-style-type: none"> • 2D/3D 가상환경에서 차량의 움직임에 따른 항법신호 모의
다중빔 방식의 Hit 생성 기능	<ul style="list-style-type: none"> • 표적 Hit 패턴 모의 기능 • 클러스터 Hit 패턴 모의 기능
데이터 저장기능	<ul style="list-style-type: none"> • 항법모의신호 및 레이더 모의 신호 저장기능 • 이동 장애물 위치/자세 저장기능

나. 다중빔 방식의 Hit 생성 기능

다중빔 방식의 FMCW레이더에서 설계된 송신 빔 및 수신 빔의 지향각을 Fig. 4에 도시하였다. 위 그림에서 보듯이 각 수신빔 총 8개로 -30°, -21°, -13°, -4°, +4°, +13°, +21°, +30°의 지향각을 가지며, 송신빔은 전체 범위를 포함하도록 설계하였다.

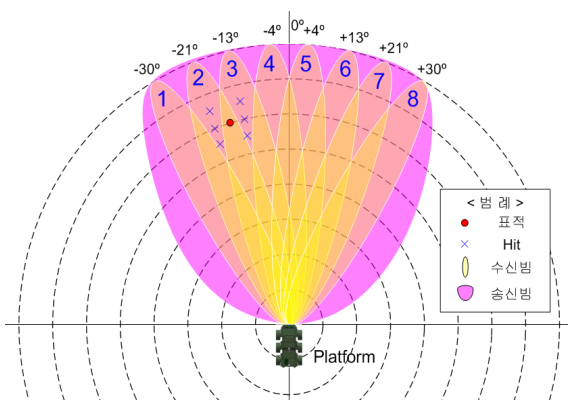


Fig. 4. Direction of beams of FMCW radar

다중빔방식을 고려한 탐지정보(Hit) 생성 기법은 다음과 같다.

- ① 거리 및 방위각 정보 생성 : 거리 및 방위각 정보 생성은 표적시뮬레이터의 디지털 고도지도에서 플랫폼과 표적간의 거리와 방위각 정보를 계산한다. 표적의 좌표를 (x_t, y_t, z_t) , 플랫폼의 좌표를 (x_p, y_p, z_p) 라고 두면, 거리 및 방위각과 같다.

$$R = \sqrt{(x_t - x_p)^2 + (y_t - y_p)^2 + (z_t - z_p)^2} \quad (1)$$

$$\theta = \tan^{-1}((x_t - x_p)/(y_t - y_p)) \quad (2)$$

- ② 수신 빔 할당 : 표적의 방위각 정보(θ)를 이용하여 8개의 수신안테나 중 어느 수신안테나 사이에 위치하는지 파악하여 표적 위치의 양 옆의 수신빔에서 표적이 탐지되었다고 가정한다. 예를 들면, Fig. 4에서의 표적이 탐지되는 빔은 2번 빔과 3번 빔이다.

- ③ Hit 생성 : 탐지된 2개의 수신 빔에서 각각 3개씩 총 6개의 Hit 정보를 생성한다. 이때 각 Hit의 거리 값은 다음과 같이 표적까지의 세가지 거리를 계산한다.

$$R, R - R_{res}, R + R_{res} \quad (3)$$

여기서, R_{res} 는 거리해상도로서 0.7m를 사용하였다.

- ④ 수신신호 세기 계산
표적에 반사되어 레이더의 i 번째 수신빔의 신호의 세기 P_{rx}^i 는 다음식으로 계산한다.

$$P_{rx}^i(R_{cell}) = \frac{P_{tx} G_t G_r n^i(\theta, \psi) G_p \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 (R)^4} K \quad (4)$$

$$P_{rx}^i(R_{cell} - R_{res}) = P_{rx}^i(R_{cell}) K' \quad (5)$$

$$P_{rx}^i(R_{cell} + R_{res}) = P_{rx}^i(R_{cell}) K'' \quad (6)$$

위 수식에서 P_{tx} 는 송신출력이며, G_t 는 송신안테나 이득, G_r 은 수신안테나 이득, $n(\theta, \psi)$ 는 안테나 지향이득, G_p 는 FFT처리이득, λ 는 파장이며, σ 는 레이더 반사단면적(RCS : Radar Cross Section)이다. K, K', K'' 은 스펙트럼의 분산 인자(spectral

spreading factor)이며 실제 레이더의 수신신호를 분석하여 실험적으로 결정하였다. 또한 R_{cell} 은 거리 셀 간격으로 0.48을 사용하였다. 수신안테나 이득 (G_r)은 표적의 위치마다 다르며, 이를 계산하기 위한 빔 패턴은 실제 FMCW 레이더의 측정치를 반영하여 계산하였으며, 계산 결과는 Fig. 5와 같다.

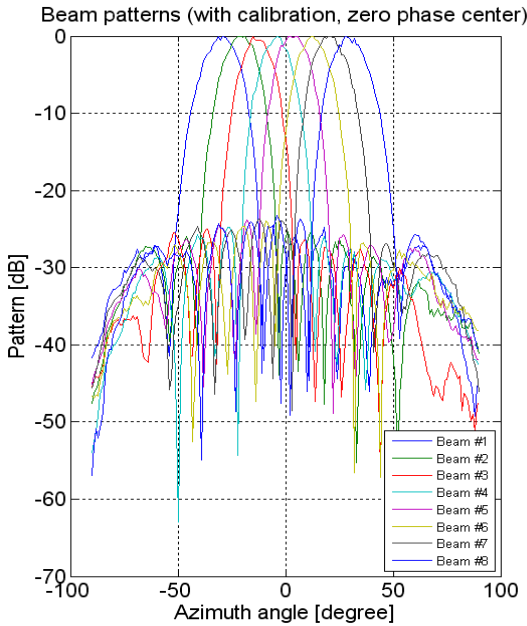


Fig. 5. Beam Patterns of Rx.

⑤ 도플러 속도 계산

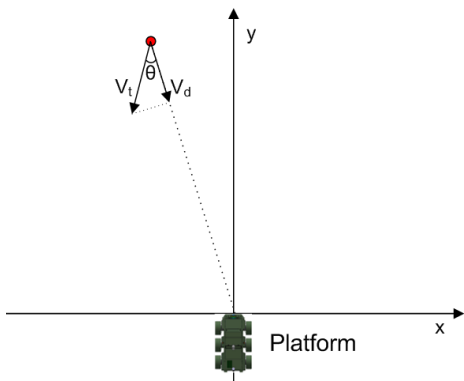


Fig. 6. Illustration of Doppler velocity

각 Hit의 도플러 속도는 다음과 같이 계산한다.

$$V_d = \begin{cases} \partial [V_t \cos(\theta) / V_{cell}] & \text{if } V_d \leq V_{max} \\ \partial [(V_t \cos(\theta) - V_{max}) / V_{cell}] & \text{if } V_d > V_{max} \end{cases} \quad (7)$$

여기서 V_t 는 표적의 속도이며, V_{cell} 은 도플러 셀 간격으로 0.465를 사용하였고, V_{max} 는 최대 속도로 27.8 m/s 이다. $round\{\cdot\}$ 는 반올림 함수이다. 도플러 셀 간격 및 R_{cell} 간격은 많은 실험을 통해서 결정하였다. Fig. 6에 도플러 속도 계산에 관한 예를 도시하였다.

3. 시뮬레이션

본 절에서는 상기 개발된 시뮬레이터를 이용하여 표적의 이동경로 생성 및 이동에 따른 탐지 처리과정을 제시한다. 야지에서의 운용성을 고려하여 무인차량 전방의 120도 각도를 포함시키기 위해 60도의 방위각 탐지 범위를 가지는 FMCW 레이더 2조를 차량 전방을 기준으로 ± 30 도씩 기울여 장착한 상황을 고려하였다.

가. 표적 경로 생성

개발된 시뮬레이터의 평가를 위해 표적 경로 생성은 단일표적, 다중표적의 경우에 대해서 고려하였다. Fig. 7은 지도상에서 표적의 이동경로를 할당하고, 레이더에서 센싱된 표적의 경로를 시뮬레이터를 통해 도시한 화면이다.



Fig. 7. Path of single moving target(left) and detected target path in radar(right)

이렇게 생성된 표적의 경로는 레이더의 탐지센싱범위 및 자차의 움직임을 고려하여 Hit 정보를 생성하게 되며, 추적장치로 전송된다.

나. 탐지처리 과정

추적장치는 탐지정보를 신호처리하여 Fig. 8과 같이 추적정보를 생성하게 된다. 본 절에서는 클러스터링 기법, 탐지정보 보상기법에 대해서 간략하게 기술한다.

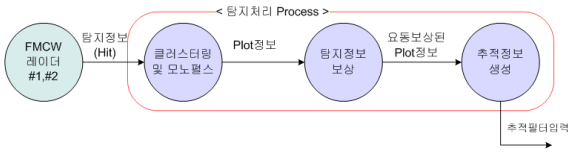


Fig. 8. Detection Process

1) 클러스터링 및 모노펄스

다중빔 방식은 하나의 버스트(burst)에서 8개의 빔을 형성하고, 각 빔별 신호처리 과정을 수행해야 한다. 여기에서 발생된 모든 Hit 들을 모두 추적에 사용하면 발생하는 Hit 데이터 양에 따라 추적필터에 심각한 처리부담을 줄 수 있다. 따라서 이러한 Hit 데이터 양을 줄일 수 있는 클러스터링 과정을 수행하며, 이 처리 과정을 거친 결과 값을 플롯(plots)이라 한다.

플롯 생성을 위한 사전 클러스터링 단계에서는 하나의 버스트(burst) 단위로 들어오는 Hit 데이터들을 가지고 각 빔별로 거리와 도플러를 기준으로 부분플롯(partial plot)을 생성하게 된다. 이때 Hit데이터들은 특정거리, 도플러셀에서 문턱치를 넘은 값들을 기준으로 하나의 클러스터로 만들어진다^[4].

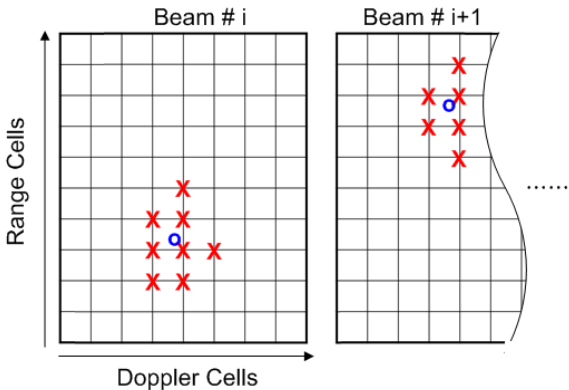


Fig. 9. Distribution of Hits(x : Hit, o : estimated position)

Fig. 9는 Hit 들의 거리와 도플러 셀 및 방위각빔에 대한 분포를 표시하였다. Hit의 연결성은 거리셀과 도플러 셀 공간에서 8방향 연결성을 사용하며, Hit들 중 q 번째 Hit는 같은 클러스터 안에 다음과 같은 조건을 만족하는 r 번째 Hit가 존재할 경우 같은 클러스터로 묶는다.

$$|j(q) - j(r)| \leq R_{th} \cap |k(q) - k(r)| \leq D_{th} \quad (8)$$

수식 (6)에서 j 와 k 는 각각 거리셀과 도플러 셀에서의 위치이며, R_{th} 는 거리셀의 문턱값, D_{th} 는 도플러 셀의 문턱값이다.

이와같이 각 빔별로 부분 클러스터링이 끝나면, 각 방위각 빔에 존재하는 클러스터에 대하여 연관성을 확인하여 클러스터링을 수행하는 동시에 보다 정확한 방위각을 계산하기 위해 클러스터간 모노펄스 과정을 수행한다.

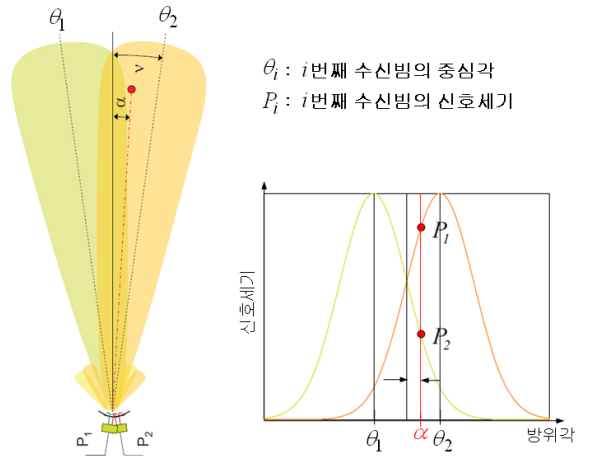


Fig. 10. Angle estimation using monopulse method

Fig. 10은 모노펄스를 통한 각도추정의 예를 나타낸 것이다. 여기서 α 는 다음과 같은 수식으로 계산된다.

$$\alpha \sim \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2} \quad (9)$$

표적의 각도(θ_{target})는 다음과 같이 계산한다.

$$\theta_{target} = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} + \alpha \cdot \beta \quad (10)$$

여기서 β 는 수신 빔 패턴과 연관된 상수로서 실험적으로 결정하였다.

이와 같은 방법으로 방위각 클러스터링을 수행하고 나면, 각 클러스터 별로 위치와 SNR, 도플러 대표값을 결정하는 과정이 필요하다. 가장 간단한 방법은 각 클러스터의 Hit 중 가장 큰 신호세기를 가진 Hit의 위치를 대푯값으로 가져가는 방법이다. 이 방법은 계산량을 줄일 수 있으나 정확하지 않다. 따라서 보다 정확

한 클러스터 위치를 얻기 위해 클러스터의 Hit 위치에 가중치를 곱하여 평균치를 계산하는 중심치 추정방법을 사용하였다. 클러스터의 신호세기도 다음과 같은 방법으로 계산하였다.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{NH_c} w_i x_i}{\sum_{i=1}^{NH_c} w_i}; \quad \bar{P}_{sig} = \frac{\sum_{i=1}^{NH_c} (w_i)^2}{\sum_{i=1}^{NH_c} w_i} \quad (11)$$

여기서, \bar{x} 는 클러스터의 중심 위치 및 도플러, NH_c : 해당 클러스터에 속하는 Hit 수. x_i : i 번째 Hit의 위치, $x_i = [Range\ cell(i), Doppler\ cell(i)]$, w_i : 해당 클러스터의 i 번째 Hit의 가중치(신호의 세기), \bar{P}_{sig} 는 클러스터의 신호 세기.

이와 같은 클러스터링과정을 통해 플롯을 생성할 수 있다. Fig. 11에는 두 대의 표적이 교차하면서 지나가는 시물레이션에 대해서 참값(Raw)와 Hit, 플롯 정보를 도시하였다. 여기서 도시된 값은 레이더의 장착 위치에 따른 보상 및 차량의 요동 보상이 이루어지지 않은 값이다.

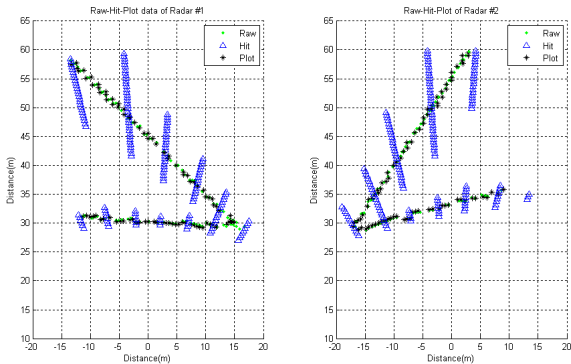


Fig. 11. Calculated plot data (left : Radar#1, right : Radar#2)

2) 탐지정보 보상

탐지정보 보상과정은 FMCW레이더의 장착 위치에 따른 보상과 차량자세보상으로 이루어 진다. 레이더의 위치에 대한 보상은 각 레이더의 장착 각도와 차량 중심으로부터 떨어진 거리를 보상하는 절차로 이루어져 있으며, 차량자세보상은 INS로부터 수신된 차량자세정보를 통하여 다음과 같이 수행한다.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & 1 \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서 ϕ 는 롤각(roll), θ 는 피치각(pitch), ψ 는 요각(yaw)을 의미한다. 이때, 구형좌표계(r, θ)에서 직각좌표계(x, y, z)로의 변환은 다음 수식과 같이 이루어지며, 플롯 메시지 정보는 Table 1과 같다.

$$x = r \cos \theta, \quad y = r \sin \theta, \quad z = 0. \quad (13)$$

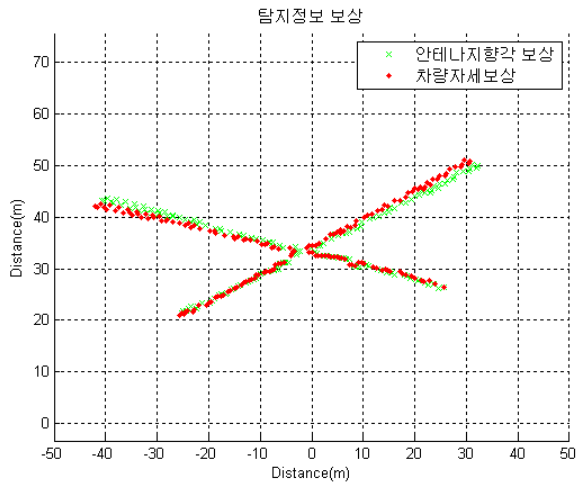


Fig. 12. Results of compensation

상기 계산된 플롯 정보 및 탐지정보 보상 결과를 참값과 비교했을 때 일치하는 것을 확인 할 수 있었다.

4. 결론

무인자율차량에 있어 전천후 주야에 활용 가능한 센서의 개발은 매우 중요하다. 본 논문은 다중빔 방식의 FMCW 레이더를 사용하는 추적장치에 활용하기 위해 개발한 표적신호 모사기법에 대하여 기술하였다.

표적신호를 모사하기 위해 표적신호 시물레이터를 제작하였고, 다중표적이동기능 및 무인차량의 주행에 의한 표적신호를 생성할 수 있도록 설계하였다. 시물레이더에서 사용되는 Hit는 다중빔 방식을 고려하여 생성하였고, 실제 레이더의 특성을 고려하여 신호세기

및 도플러 속도를 생성하는 기법을 제안하였다. 이렇게 만들어진 모사신호는 추적장치로 전송되어 탐지정보 처리과정을 거친다. 이때, 클러스터링 기법 및 탐지정보 보상에 관한 내용을 기술하였다.

개발된 표적신호 시뮬레이터는 FMCW 레이더의 추적장치 개발에 유용하게 활용될 뿐만 아니라 향후 다중빔을 활용하는 레이더에도 효과적으로 사용할 수 있을 것으로 사료된다. 추후 표적 모사시 빔간의 간섭, 다중경로(Multi-path)에 의한 신호세기 변경 및 레이더 반사 단면적(RCS)을 가변시키는 기법, 각종 잡음에 관한 연구가 이루어지는 것이 필요하다.

References

- [1] Jerry L. Eaves and Edward K. Reedy, Principles of Modern Radar, NewYork, Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1987.
- [2] Merrill I. Skolink, Introduction to Radar Systems, New York, McGraw-Hill Book Co., 2011
- [3] Merrill I. Skolinik, Radar Handbook, New York, McGraw-Hill Book Co., 1990.
- [4] 김관성, “다중빔 레이더의 플롯형성을 위한 사전 클러스터링” 국방과학연구소 보고서, ADDR-517-080649, 2008.