

## 특징점 추출 및 매칭을 이용한 ISAR 영상의 수직-거리 스케일링 기법 연구

# ISAR Cross-Range Scaling Method Using Feature Extraction and Matching

유보현 · 이경민 · 이인혁 · 김경태

Bo-Hyun Ryu · Kyung-Min Lee · In-Hyeok Lee · Kyung-Tae Kim

### 요 약

본 논문에서는 두 개의 순차적인 역합성 개구면 레이더(inverse synthetic aperture radar: ISAR) 영상을 활용하여 표적의 회전 속도(rotation velocity: RV)를 추정하고, ISAR 영상의 수직-거리 스케일링(cross-range scaling: CRS)을 수행하는 기법을 제안한다. 먼저, 순차적으로 형성된 두 개의 ISAR 영상에서 각각 관측 각도의 변화 및 영상의 반짝임(scintillation)에 강인한 특징점 및 산란원을 추출한다. 이어서, 두 영상 사이에 동일한 특징점이 대응되도록 특징점 매칭을 수행한다. 본 논문에서는 SIFT(scale invariant feature transform) 기법을 적용하여 특징점을 추출하고, 추출된 특징점에 최근접 이웃 탐색(nearest neighbor distance ratio: NNDR)과 랜덤 표본 합의(random sample consensus: RANSAC)를 적용하여 두 번의 매칭 과정을 수행한다. 이를 통해, 두 개의 순차적인 ISAR 영상 사이의 호모그래피(homography)를 획득하고, 표적의 유효 회전 중심(effective rotation center: ERC)에 대한 정보 없이 표적의 회전 속도를 추정한다. 본 논문에서는 점 산란원 기반의 모의시험 데이터를 활용하여 제안된 기법의 효용성을 검증하였다.

### Abstract

A method that utilizes two sequential inverse synthetic aperture radar (ISAR) images to estimate the rotation velocity of the target and perform cross-range scaling of ISAR images is proposed. First, features/scatterers that are robust against the change in aspect angle and the scintillation between two sequential ISAR images are extracted. Next, extracted features are matched such that the same feature corresponds between the two sequential ISAR images. To accomplish this, scale-invariant feature transform is adopted for feature extraction, followed by feature matching through nearest-neighbor distance ratio and random sample consensus techniques. In this way, a homography between two sequential ISAR images can be obtained and the rotational velocity of the target can be deduced without *prior* knowledge of the equivalent rotational center of the target. To demonstrate the effectiveness of the proposed method, the results of a simulation dataset for point scatterers are provided.

Key words: Radar Imaging, ISAR, SIFT, RANSAC, Homography Estimation

### I. 서 론

역합성 개구면 레이더(inverse synthetic aperture radar:

ISAR)는 고정된 레이더에서 움직이는 표적에 전자기파를 방사하고, 표적으로부터 반사된 신호를 이용하여 표적을 2차원 영상의 형태로 도시하는 레이더이다<sup>[1]</sup>. ISAR는 기

포항공과대학교 전자전기공학과(Department of Electrical Engineering, Pohang University of Science and Technology)

· Manuscript received September 7, 2021 ; Revised October 3, 2021 ; Accepted January 28, 2022. (ID No. 20210907-075)

· Corresponding Author: Kyung-Tae Kim (e-mail: kkt@postech.ac.kr)

존의 광학 센서와 달리 주야에 관계없이 관측이 가능하고, 기상 환경에 영향을 받지 않으므로 자동 표적 식별 및 비협조 표적 식별 등의 표적의 피아 식별을 효과적으로 수행한다. 이러한 장점으로 ISAR는 현재 국방 및 민수 분야에서 다양하게 활용되고 있다.

ISAR 영상 형성 기하구조 내 기동하는 표적의 움직임은 레이더와 표적 사이의 레이더 가시선 방향으로 거리(range)가 변하는 병진 운동 성분과 레이더에 대한 표적의 관측 각도가 변하는 회전 운동 성분으로 구분된다. 이 때 초점이 맞는 ISAR 영상을 형성하기 위해선 두 운동 성분 중 관측 각도 변화율이 일정한 회전 운동 성분이 필요하다<sup>[2]</sup>. 대공 표적의 경우, 표적에 대한 레이더 관측 시간(coherent processing interval: CPI)이 짧기 때문에 CPI 내에서 관측 각도 변화율이 일정하다고 가정한다. 이 경우, 수신 신호에 병진 운동 보상을 수행하고, 거리-도플러(range-Doppler: RD) 기법을 적용하여 초점이 맞는 ISAR 영상을 형성할 수 있다<sup>[2]</sup>.

RD 기법으로 형성된 영상은 거리-도플러 주파수 영역에서 형성되며, 도플러 주파수 영역의 해상도는 CPI 및 표적의 회전 속도에 의해 결정된다. 즉, 동일 표적에 대해서도 다른 CPI에 따라 다른 거리-도플러 영역의 ISAR 영상이 획득되므로 상황에 따라 다른 표적 식별 결과를 야기한다. 따라서 거리-도플러 주파수 영역의 ISAR 영상을 표적의 실제 크기에 대응되는 거리 및 수직-거리 영역으로 변환하는 과정이 필요하며, 이를 수직-거리 스케일링(cross-range scaling: CRS)이라 한다.

ISAR CRS 기법은 크게 두 가지로 구분된다: 신호 기반 기법<sup>[3]~[5]</sup> 과 영상 기반 기법<sup>[6]~[8]</sup>이다. 먼저, 신호 기반 기법은 거리 정렬 수행된 신호에 특정 거리 빈(range bin)의 위상 정보를 획득하여 표적의 회전 속도를 추정한다. 해당 기법은 위상 정보를 이용하므로 잡음 등에 민감하며 낮은 신호 대 잡음 비(signal to noise ratio: SNR)에서 급격한 성능 저하를 겪는다. 특정 기법<sup>[5]</sup>은 낮은 SNR에서도 높은 표적 속도 추정 성능을 보이나, 선택된 거리 빈 안에 다수의 산란원이 존재하는 경우 표적 속도 추정 과정에 오차가 발생한다. 다음으로, 영상 기반 기법은 두 개의 순차적인 ISAR 영상 간의 회전 및 스케일(scale) 관계를 이용하여 표적의 회전 속도를 추정하는 방식이다. 이

경우, 두 거리-도플러 주파수 영역 영상 내 표적의 유효 회전 중심(effective rotation center: ERC)의 정보가 필요하며, 두 영상의 회전 관계 추출 과정에서 높은 계산량이 요구된다는 단점이 있다.

최근 영상 기반 기법의 ERC 및 높은 계산량의 문제를 해결하기 위하여 특징점 추출(feature extraction)을 이용한 연구가 제안되었다<sup>[9]~[11]</sup>. 구체적으로, 순차적으로 형성된 두 개의 ISAR 영상에 각각 FAST(features accelerated segment test)를 적용하여 산란원 쌍을 추출한다. 이어 추출된 산란원 쌍에 주성분 분석을 수행하여 두 ISAR 영상의 고유벡터를 획득한다. 두 영상의 고유벡터 사이의 각도를 추정하여 표적의 회전 속도를 추정한다. 제안된 기법은 빠르고 정확하게 표적의 회전 속도를 추정할 수 있으나, 추출된 산란원 쌍 사이의 매칭 과정이 없어 두 영상 사이에 반짝임(scintillation) 등이 발생하는 경우 급격한 성능 저하를 겪는다. 따라서 관측 각도 변화 및 영상의 scintillation에 강인한 산란원을 추출하고, 추출된 산란원을 올바르게 매칭하는 과정이 필요하다.

본 논문에서는 두 개의 순차적인 ISAR 영상에 SIFT(scale invariant feature transform)<sup>[12]</sup>를 적용하여 관측 각도 변화에 영향받지 않는 산란원을 추출한다. 이어 추출된 산란원 중 두 영상 사이에 동일한 산란원이 대응되도록 매칭 과정을 수행한다. 이에는 최근접 이웃 탐색(nearest neighbor distance ratio: NNDR)<sup>[11]</sup> 및 랜덤 표본 합의(random sample consensus: RANSAC)<sup>[13]</sup> 등의 두 번의 매칭 과정이 포함된다. 이 중 RANSAC의 경우, NNDR을 통해 매칭된 산란원 쌍 사이에 이상점을 효과적으로 제거하며, 두 영상 사이의 호모그래피(homography)를 획득할 수 있다. 본 논문에서는 획득한 호모그래피를 이용하여 표적의 회전 속도를 추정하는 기법에 관하여 제안한다. 제안된 기법은 기존의 기법들에 비하여 직접적으로 표적의 회전 속도를 추정하며, 영상의 scintillation 등이 발생하는 환경에서도 강인한 변수 추정 성능을 보인다.

본 논문의 2장에서는 두 개의 순차적인 ISAR 영상 사이의 회전 및 스케일 관계에 관하여 정의하고, 표적의 회전 속도 추정에 발생하는 기존의 영상 기반 기법들의 문제점에 관하여 분석한다. 3장에서는 제안된 기법에 관하여 서술하며, 이에는 1) 특징점/산란원 추출 및 매칭과 2)

이상점 제거 및 호모그래피 획득을 통한 표적의 회전 속도 추정 과정이 포함된다. 마지막 4장에서는 모의실험 결과를 도시하여 제안된 기법의 효용성을 증명한다.

## II. 문제 설명

본 절에서는 두 개의 순차적인 ISAR 영상 간의 회전 및 스케일 관계에 관하여 기술한다. CPI 동안 레이더와 기동 표적 사이의 상대적인 움직임은 2차원 평면에 국한된다(그림 1)<sup>[2]</sup>. 병진 운동 성분 보상 후, 표적은 일정한 각속도를 갖고 회전한다. CPI 내 일정 간격의 특정 시점( $t_1, t_2$ )에서 거리-도플러 기법으로 두 개의 순차적인 ISAR 영상  $I_1$ 과  $I_2$ 을 형성한다. 두 영상 사이의 시간 차  $T_m = t_2 - t_1$ 에 의한 관측 각도(rotation angle: RA) 변화량은  $\Delta\theta = \omega T_m$ 이며, 표적은 다음의 관계를 만족한다<sup>[11]</sup>.

$$(p_2 - o_c) = R(\Delta\theta)(p_1 - o_c) \quad (1)$$

여기서  $p_1 = [x_1 y_1]^T$ 와  $p_2 = [x_2 y_2]^T$ 는 각각  $t_1$ 과  $t_2$ 의 시점의 거리/수직-거리 영역에서의 표적의 위치,  $o_c = [x_c y_c]^T$ 는 거리/수직-거리 영역에서의 표적의 ERC이다. 식 (1)의  $R(\Delta\theta)$ 는 회전 행렬이며, 다음과 같이 표현된다.

$$R(\Delta\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\Delta\theta) & \sin(\Delta\theta) \\ -\sin(\Delta\theta) & \cos(\Delta\theta) \end{bmatrix} \quad (2)$$

일반적으로 거리/수직-거리 영역( $X, Y$ )[m-m]과 거리/도플러 주파수 영역( $x, y$ )[m-Hz]은 식 (3)의 스케일 관계를 만족하므로, 식 (1)은 아래의 식 (4)와 같이 변화된다<sup>[11]</sup>.

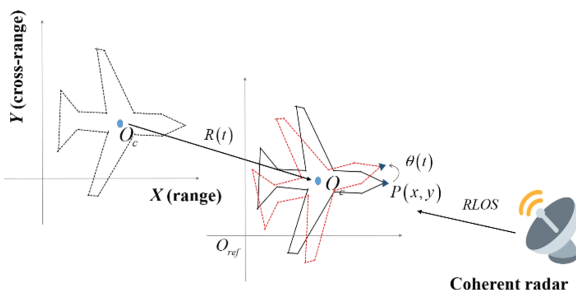


그림 1. ISAR 영상 형성 기하구조  
Fig. 1. Geometry of ISAR imaging.

$$X = \eta_r x = \frac{c}{2B} x, Y = \eta_c y = \frac{\lambda f_r}{2M\omega} y \quad (3)$$

$$S(\omega)(P_2 - O_c) = R(\Delta\theta)S(\omega)(P_1 - O_c) \quad (4)$$

여기서  $c$ 는 빛의 속도,  $B$ 는 송신 파형의 주파수 대역폭,  $\lambda$ 는 파장,  $f_r$ 은 펄스 반복 주파수,  $M$ 은 두 ISAR 영상 형성 시 사용된 버스트 신호 개수이다. 식 (4)의  $S(\omega) = \text{diag}[\eta_r, \eta_c]$ 은 스케일링 매트릭스,  $P_1 = [X_1 Y_1]^T$ 와  $P_2 = [X_2 Y_2]^T$ 는 각각 거리-도플러 주파수 영역의  $I_1$ 과  $I_2$  영상에서의 표적의 위치,  $O_c = [X_c Y_c]^T$  표적의 ERC이다.  $S(\omega)$ 는 정칙행렬(non-singular matrix)이므로 식 (4)는 식 (5)와 같이 표현된다.

$$(P_2 - O_c) = S^{-1}(\omega)R(\Delta\theta)S(\omega)(P_1 - O_c) = A(\Delta\theta)(P_1 - O_c) \quad (5)$$

식 (5)의  $A(\Delta\theta)$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$A(\Delta\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\Delta\theta) & \frac{\eta_c}{\eta_r} \sin(\Delta\theta) \\ -\frac{\eta_r}{\eta_c} \sin(\Delta\theta) & \cos(\Delta\theta) \end{bmatrix} \quad (6)$$

식 (6)의 결과, 거리-도플러 주파수 영역의  $P_1$ 과  $P_2$ 는  $S(\omega)$ 와  $R(\Delta\theta)$ 의 결합으로 표현되므로  $P_1$ 과  $P_2$  사이 직접적인 회전 각도의 추정을 어렵게 한다. 이에 기존의 영상 기반 CRS 기법들은 비용 함수(cost function)<sup>[9],[10]</sup> 혹은 영상의 품질 변수(i.e. entropy, contrast)<sup>[6]~[8]</sup> 등의 최적화를 수행하여 두 영상 사이의 회전 각도 및 표적의 회전 속도를 추정하였다. 해당 기법들은 변수 추정 과정이 반복적으로 수행되므로 높은 계산량이 요구된다. 본 논문에서는 식 (5)의 관계를 만족하는 산란원을 추출하여 기존 기법 대비 계산 효율을 향상시키고,  $I_1$ 과  $I_2$  사이의  $A(\Delta\theta)$ 를 획득하여 표적의 회전 속도를 추정하는 기법을 제안한다. 산란점 추출 과정에 SIFT를 활용할 경우, 두 영상 사이의 scintillation 및 넓은 관측 각도 변화에 강인한 산란원 추출이 가능하며, 추출된 산란원은 NNDR 기법을 통해 동일 산란원으로 매칭된다. 이어서, RANSAC 알고리즘을 수행하여 NNDR 기법으로 매칭된 산란원 사이에 존재하는 이상점을 효과적으로 제거하고, 두 영상 사이의 호모그래피를 획득한다. 두 영상 사이의 호모그래피는 식

(6)의  $A(\Delta\theta)$ 를 만족한다. 획득한 호모그래피를 통해 별도의 반복 과정 없이 표적의 회전 속도를 직접적으로 추정한다.

### III. 제안된 영상 기반 ISAR CRS 기법

본 절에서는 제안된 영상 기반 ISAR CRS 기법에 관하여 서술한다. 제안된 기법은 크게 1) 특징점/산란원 추출 및 매칭과 2) 이상점 제거 및 표적의 회전 속도 추정으로 구분된다.

#### 3-1 특징점/산란원 추출 및 매칭

SIFT는 2004년 Lowe David G. 교수에 의해 제안된 방법으로, 영상의 회전 및 스케일, 유사성을 가진 변형, 관점 변화, 잡음 및 조명 변화 등에 불변하는 특징점을 추출하는 알고리즘이다<sup>[12]</sup>. 이러한 특징으로 SIFT는 회전 및 스케일 관계의 두 개의 순차적인 ISAR 영상에서 넓은 관측 각도 변화 및 영상의 scintillation 등에 강인한 산란원을 추출하는데 적합하다. SIFT는 크게 4 단계를 거쳐 수행된다<sup>[12]</sup>.

(Step 1) 스케일 공간 극값 검출(scale-space peak selection): 서로 다른 스케일 값을 갖는 가우시안 차이 함수에서 스케일 공간의 극값을 이용하여 주요 특징점들의 위치 및 스케일을 식별한다

(Step 2) 주요 점 지역화(key-point localization): 낮은 대비 점을 제거하고, 헤시안 행렬을 이용하여 곡선에 위치하는 주요 특징점을 제거한다

(Step 3) 방향성 배치(orientation assignment): 회전 불변성 획득을 위하여 주요 특징점이 위치한 주변 영역 내에서 기울기 기반 방향 히스토그램을 구한다

(Step 4) 특징점 기술자 생성(key-point descriptor): 주요 특징점에 대한 지역 영상 기술자를 계산한다. 기울기와 위치에 방향에 대한 3차원 히스토그램을 구성하며 각각은  $4 \times 4 = 16$  배열 그리드와 8 방향의 빈을 가진다. 즉, SIFT 기술자는 128-차원 벡터 값을 갖는다. 4 단계 이후 영상의 회전 및 조명 변화 등에 강인한 특징점 추출에 추가적인 과정이 수행될 수 있다.

두 개의 순차적인 거리-도플러 주파수 영역의 ISAR 영상( $I_1, I_2$ )에 SIFT 알고리즘을 수행하여, 각각 SIFT 특징점/산란원과  $\mathbf{a} = [\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_K] \in \mathcal{R}^{128 \times K}$ 와  $\mathbf{b} = [\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2, \dots, \mathbf{b}_Q] \in \mathcal{R}^{128 \times Q}$ 의 SIFT 기술자를 획득한다. 이어  $\mathbf{a}$ 와  $\mathbf{b}$  사이의 매칭을 수행하기 위하여 유클리디언 거리  $d$ 를 계산한다.

$$\forall k \ d(q) = \arg \|\mathbf{a}_k - \mathbf{b}_q\| \quad (7)$$

여기서  $k=1,2,\dots,K$ 와  $q=1,2,\dots,Q$ 는 각각  $\mathbf{a}$ 와  $\mathbf{b}$ 의 인덱스이다. 식 (7)의 결과,  $\mathbf{a}$ 와  $\mathbf{b}$ 의 모든 SIFT 특징점 및 기술자는 두 ISAR 영상  $I_1$ 과  $I_2$  사이에 매칭된다. 그러나 두 영상 간의 매칭 쌍은 단 하나만 존재하지 않는다. 즉, 가장 가까운 매칭이 두 번째 매칭 값과 유사하여 하나의 특징점에 다수의 특징점이 매칭될 수 있다. 따라서 NNDR을 수행하여 다음과 같이 매칭 정확도를 계산한다<sup>[11]</sup>.

$$NNDR = \frac{d_1}{d_2} < G \quad (8)$$

식 (8)의  $d_1$ 과  $d_2$ 는  $\mathbf{a}$ 와  $\mathbf{b}$  사이에 가장 작은 유클리디언 거리값과 두 번째로 작은 유클리디언 거리값이다. NNDR 이 1에 가까울수록 하나의 특징점에 다수의 특징점이 매칭될 수 있으므로 매칭 정확도가 낮다. 여기서 임계값  $G$ 를 설정하여 적절한 매칭 정확도를 얻는다. NNDR의 결과,  $I_1$ 과  $I_2$  사이에  $P$  개의 매칭 쌍을 획득한다.  $\mathbf{a}_m$ 과  $\mathbf{b}_m \in \mathcal{R}^{3 \times P}$ 는 각각  $I_1$ 과  $I_2$ 의 2차원 영상에서의 위치 값을 갖는 매칭 쌍이다.

#### 3-2 이상점 제거 및 표적의 회전 속도 추정

식 (5)의 관계를 만족하기 위해서 표적의 ERC의 정보가 필요하다. 본 논문에서는 매칭된 산란원 쌍의 거리-도플러 주파수 영역의 위치의 평균 값을 이용하여 ERC를 대체한다.

$$\overline{\mathbf{a}}_m = \mathbf{a}_m - \frac{1}{P} \sum \mathbf{a}_m, \quad \overline{\mathbf{b}}_m = \mathbf{b}_m - \frac{1}{P} \sum \mathbf{b}_m \quad (9)$$

식 (9)의  $\overline{\mathbf{a}}_m$ 과  $\overline{\mathbf{b}}_m$ 은 호모그래피  $\mathbf{H} \in \mathcal{R}^{3 \times 3}$ 을 만족한다.

$$\overline{\mathbf{b}}_m = \mathbf{H} \overline{\mathbf{a}}_m \quad (10)$$

일반적으로 RANSAC은 잡음 및 이상점이 존재하는 데

이터에서 이상점을 제거하고 데이터의 모델을 예측하는 알고리즘이다. 특징점/산란원 매칭 과정에 RANSAC을 사용할 경우 NNDR 수행으로 매칭된 산란원 쌍에 존재하는 이상점을 효과적으로 제거하고 식 (10)의 호모그래피 행렬  $H$ 를 획득 할 수 있다. RANSAC의 주요 과정은 크게 4가지로 구성된다<sup>[13]</sup>.

- (Step 1)  $\overline{a_m}$ 과  $\overline{b_m}$ 의 매칭 쌍 중 임의의 네 쌍을 추출하여 식 (10)의 호모그래피 행렬  $\hat{H}$ 를 추정한다.
- (Step 2) 나머지 매칭 쌍이 Step 1에서 획득한  $\hat{H}$ 를 만족하는지 확인한다.
- (Step 3) Step 2에서 만족하는 최대 매칭 쌍을 확보한다.
- (Step 4) Step 3에서 확보한 최대 매칭 쌍의 호모그래피 행렬을 재계산한다.

RANSAC의 결과, NNDR 수행 후 매칭된  $P$  개의 매칭 쌍 중, 이상점이 제거되어  $L$  개의 매칭 쌍을 획득한다. 획득한 매칭 쌍은 두 개의 순차적인 ISAR 영상 사이의 회전 및 스케일 관계를 만족하므로 추정된 호모그래피는 다음과 같이 표현된다.

$$H(\Delta\theta) = \begin{pmatrix} A(\Delta\theta) & b \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\Delta\theta) & \frac{\eta_c}{\eta_r} \sin(\Delta\theta) \\ -\frac{\eta_r}{\eta_c} \sin(\Delta\theta) & \cos(\Delta\theta) \\ 0 & 1 \end{pmatrix} b \quad (11)$$

식 (11)의  $0 \in \mathcal{R}^{1 \times 2}$ 는 영벡터(zero-vector)이고,  $b \in \mathcal{R}^{2 \times 1}$ 은  $I_1$ 과  $I_2$  사이에 존재하는 변위 차이이다.

식 (6)과 식 (11)의 결과, 행렬  $A(\Delta\theta)$ 와  $H(\Delta\theta)$ 의 행렬식(determinant)은 1이다. 즉, 특징점/산란원 추출 및 매칭 결과, 매칭 정확도가 높을수록 획득한 호모그래피의 행렬식이 1에 근접한다. 본 논문에서는 매칭된 특징점/산란원 쌍의 회전 및 스케일 관계를 유지하기 위하여 다음의 과정을 RANSAC 알고리즘에 추가하는 방식을 제안한다.

- (Step 5) Step 4에서 추정된 호모그래피 행렬의 행렬식  $\det(\hat{H})$ 를 계산한다.  $\det(\hat{H})$  값이 1에 수렴하도록 Step 1-5의 과정을 반복한다

Step 5의 결과, 획득한 호모그래피 행렬을 통해 표적의

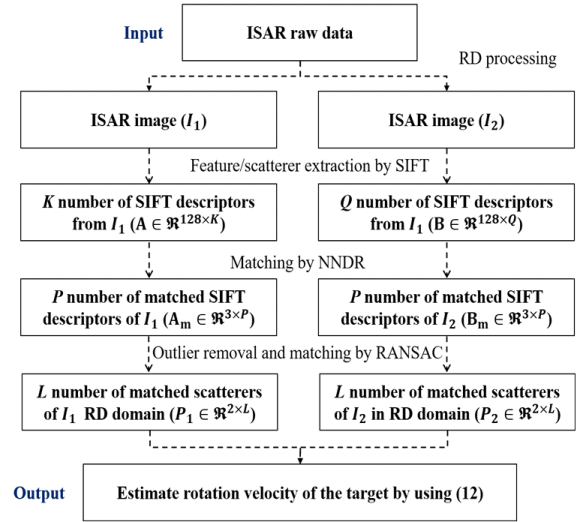


그림 2. 제안된 ISAR CRS 기법의 흐름도  
Fig. 2. Flowchart of the proposed method.

회전 속도는 다음과 같이 계산된다.

$$\hat{\omega} = \frac{1}{T_m} \Delta\theta = \frac{1}{T_m} \cos^{-1} \left[ \frac{\text{tr}(\hat{H}(\Delta\theta)) - 1}{2} \right] \quad (12)$$

여기서  $\text{tr}(\cdot)$ 는 행렬의 대각합(trace)를 계산하는 연산자이다. 식 (12)의 결과, 기존 기법들과 달리 표적의 회전 속도를 직접적으로 추정할 수 있음을 확인하였다. 본 논문에서 제안된 영상 기반의 CRS 기법의 흐름도는 그림 2에 도시되어 있다.

#### IV. 실험 결과

본 절에서는 제안된 기법의 점 산란원 기반의 모의실험 결과에 관하여 기술한다.

표적의 위치 및 이동 방향은 레이다를 원점으로 하는 직교좌표  $[xyz]^T$ 를 기반으로 표기되었으며, 표적의 길이, 폭, 그리고 높이는 각각 40 m, 20 m, 그리고 10 m의 크기를 갖는 83개의 점 산란원으로 구성된 항공기(Boeing-737) 모델을 사용하였다(그림 3a). 본 모의시험에서는 표 1의 LFM(linear frequency modulation) 신호를 사용하였으며, 표적은 CPI=1.2 s 동안  $\omega = 0.125 \text{ rad/s}$ 의 균일한 각속도를 갖고 회전한다. 표적의 회전 각도는  $8.6^\circ$ 이며 회전 운동 성분은 그림 3(b)에 도시되어 있다. CPI동안 총 480

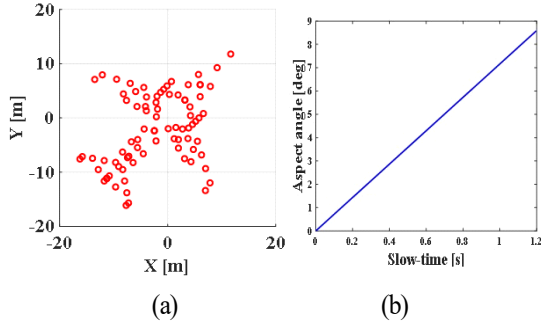


그림 3. (a) Boeing-737 항공기 모델, (b) 표적의 회전 운동 성분  
Fig. 3. (a) Aircraft model of Boeing-737, (b) rotation motion of a target.

표 1. 시뮬레이션 파라미터  
Table 1. Simulation parameters.

Carrier frequency	9 GHz
Frequency bandwidth	500 MHz
Range resolution	0.3 m
Pulse width	10 us
Pulse repetition frequency	400 Hz

개의 버스트가 수신되었으며, 240개씩 균등하게 분리되어 두 개의 순차적인 ISAR 영상  $I_1$ 과  $I_2$ 를 형성한다.  $I_1$ 과  $I_2$  사이의 시간차는  $T_m = 0.6$  s이며 RD 기법 수행 후  $I_1$ 과  $I_2$ 의 영상에 제로-패딩(zero-padding)을 수행하여 거리 및 도플러 주파수 영역으로 각각 1500개와 720 개의 빈을 획득한다(그림 4).

$I_1$ 과  $I_2$ 에 SIFT 알고리즘을 수행한 결과, 각각 196개와

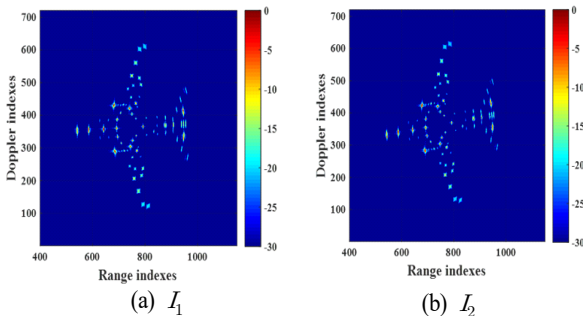


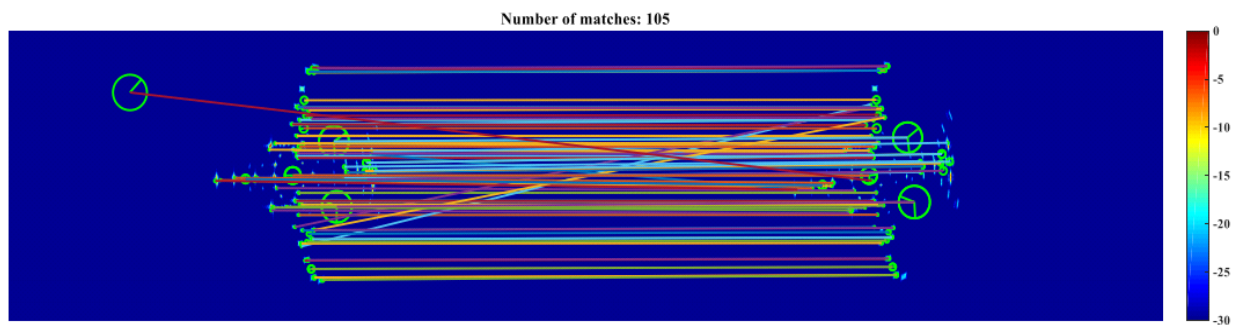
그림 4. 거리-도플러 주파수 영역의 두 개의 순차적인 ISAR 영상  
Fig. 4. Two sequential ISAR images in range-Doppler domain.

182개의 산란원 및 기술자를 추출하였다. 그림 5(a)는 NNDR 수행 후  $I_1$ 과  $I_2$ 에 매칭된 105개의 매칭 쌍을 도시한다. 그림 5(a)의 결과 NNDR 수행 후에도 몇몇 산란원 쌍이 잘못 매칭됨을 확인할 수 있다. 본 논문에서는 RANSAC의 Step 1-4 수행 결과 NNDR 결과 매칭된 산란원 쌍의 90 % 이상이 확보되며, 획득한 호모그래피 행렬의 행렬식의 크기가 1과 매우 유사한 경우 매칭이 종료하도록 설정하였다(i.e.  $|\det(\hat{H})| \leq 1.0001$ ). 이 결과, 105개의 매칭 쌍 중 이상점을 제거하여 92개의 매칭 쌍을 획득한다(그림 5b). 그림 5(b)의 경우 추정된 호모그래피 행렬은  $\hat{H} = \begin{bmatrix} 0.9936 & -0.0542 & -0.5185 \\ 0.1092 & 1.0003 & 2.124 \\ -0.000 & 0.0000 & 1.0000 \end{bmatrix}$ 이었으며, 식 (12)의 결

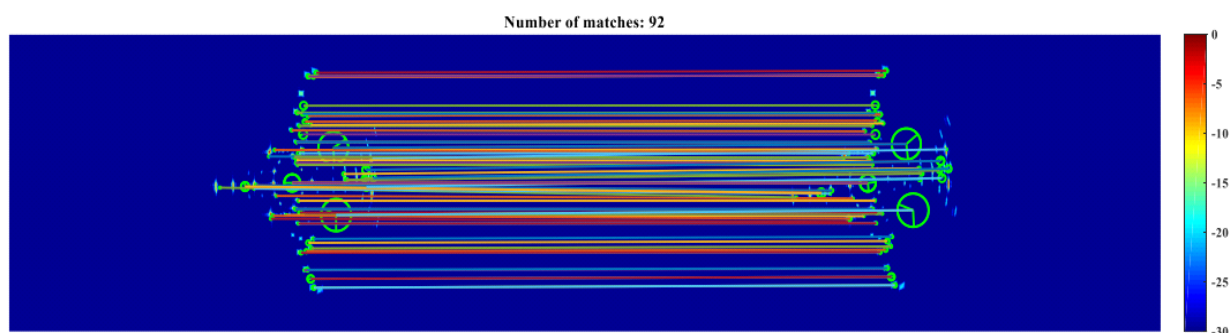
과로 추정된 표적의 회전 속도는  $\hat{\omega} = 0.129 \text{ rad/s}$ 이다. 실제 값과 추정값 사이의 평균 제곱근 오차(root mean square error: RMSE) 값이 3.36 %로 실제 값에 근사한 추정 결과를 보인다. 이와 달리 그림 5(c)는 일반적인 네 단계의 RANSAC 알고리즘을 수행하여 매칭된 산란원 쌍의 결과이다. 그림 5(b)의 경우 추정된 호모그래피 행렬의 행렬식은 1.0001로 1에 매우 근접한 값이었고, 5(c)의 경우 1.0792로 1에서 벗어난 값을 보인다. 즉, 본 논문에서 제안된 Step 5의 과정으로 매칭 쌍에 존재하는 이상점을 효과적으로 제거하고, 두 개의 순차적인 ISAR 영상 사이의 회전 및 스케일 관계를 만족하는 매칭 쌍을 획득함을 확인하였다.

본 논문에서는 제안된 기법의 효용성을 증명하기 위하여 기존의 영상 기반 CRS 기법들<sup>[10],[11]</sup>과의 성능 분석을 수행하였다. 여기서 참고문헌 [10]의 기법을 PCA-CRS로, 참고문헌 [11]의 기법을 PSO-CRS라 명명한다. SNR을 -5 dB부터 25 dB까지 5 dB 간격으로 변화시켜 각 SNR 별로 100 번씩 몬테-카를로(Monte-Carlo) 모의시험을 수행한다. 그림 6과 그림 7은 SNR 변화에 따라 각 기법별 평균 RMSE 오차와 평균 계산 시간을 도시한 결과이다. 제안된 기법과 PSO-CRS 기법은 SIFT를 적용하여 산란원을 추출하고 NNDR과 RANSAC을 통한 두 단계의 산란원 쌍 매칭을 수행한다. 이에 제안된 기법과 PSO-CRS 기법은 전 SNR 구간에서 상대적으로 낮은 RMSE 오차를 갖는다(그림 6). 이와 달리 PCA-CRS 기법은 FAST 기반의 산란원 추출 후, 산란원 쌍의 매칭과정 없이 표적의 회전 속도

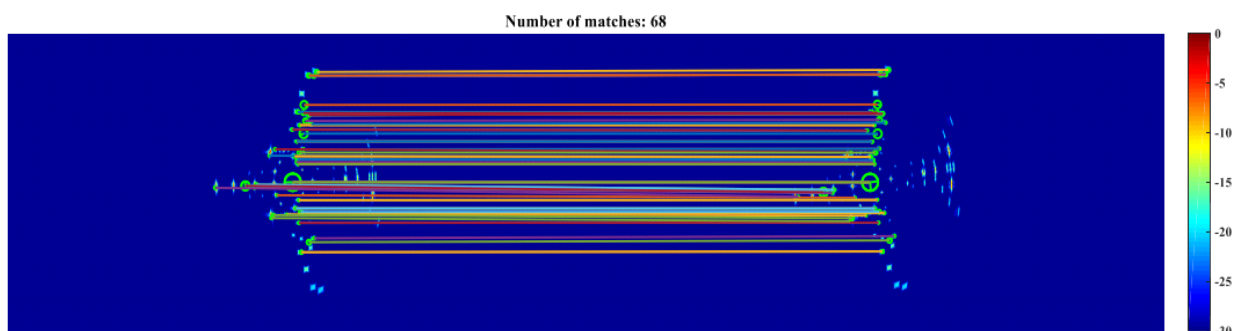




(a) NNDR 수행 후  
(a) NNDR



(b) 제안된 RANSAC 알고리즘 수행 후  
(b) The proposed RANSAC algorithm



(c) 기존의 RANSAC 알고리즘 수행 후 결과  
(c) The conventional RANSAC algorithm

그림 5.  $I_1$  과  $I_2$  사이의 산란원 쌍 매칭 결과  
Fig. 5. Matched scatterers between  $I_1$  and  $I_2$ .

를 추정하므로 낮은 SNR에서 높은 변수 추정 오차를 갖는다. 이는 낮은 SNR 환경에서 영상에 scintillation 등이 발생하며 이에 따라 표적의 변수 추정 과정에 오차가 야

기되기 때문이다.

PCA-CRS에서 사용된 FAST 알고리즘은 SIFT에 비해 계산량이 작다. 또한 PCA-CRS 기법은 산란원 쌍의 매칭

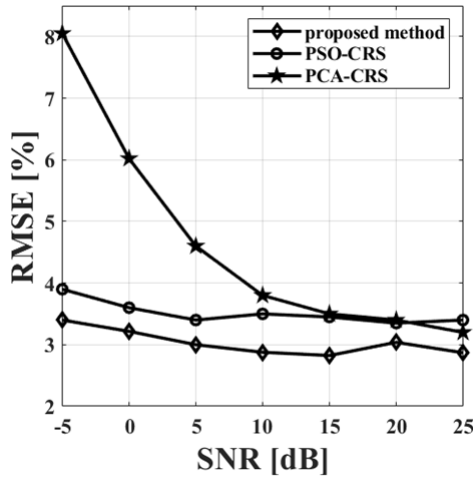


그림 6. SNR 변화에 따른 CRS 기법들의 실제 회전 속도 대비 추정 값의 RMSE 오차  
Fig. 6. Comparison of RMSE between true RV and estimates of various CRS methods in different SNRs.

과정이 없으므로 세기법 중 가장 계산 효율이 좋다. PSO-CRS 기법의 경우, 표적의 회전 속도 변수 추정에 입자 군집 최적화 기법이 사용되므로 계산 시간이 오래 걸린다. 이와 달리 제안된 기법은 반복 과정 없이 직접적으로 표적의 회전 속도를 추정하므로 PSO-CRS 기법에 비해 높은 계산 효율을 보인다. 그림 6과 그림 7의 결과, 제안된 기법이 기존의 영상 기반 CRS 기법들에 비하여 높은 변수 추정 정확도와 계산 효율을 동시에 만족한다.

## V. 결 론

본 논문에서는 두 개의 순차적인 ISAR 영상 사이의 회전 및 스케일 관계를 이용하는 영상 기반 CRS 기법에 관하여 제안하였다. 제안된 기법은 크게 특징점/산란원 추출을 통한 산란원 쌍 매칭 과정과 표적의 회전 속도 추정 과정으로 구분된다. 먼저, SIFT를 수행하여 두 개의 순차적인 ISAR 영상에서 회전 및 스케일 변화에 강인한 산란원을 각각 추출한다. 이어 NNDR을 적용하여 추출된 산란원 간에 올바른 매칭을 수행한다. NNDR 수행 후에도 존재하는 이상점 제거를 위하여 RANSAC 알고리즘을 적용한다. 기존의 RANSAC 알고리즘의 경우 이상점 제거에 효과적이나 매칭된 산란원 쌍 간에 회전 및 스케일 관계

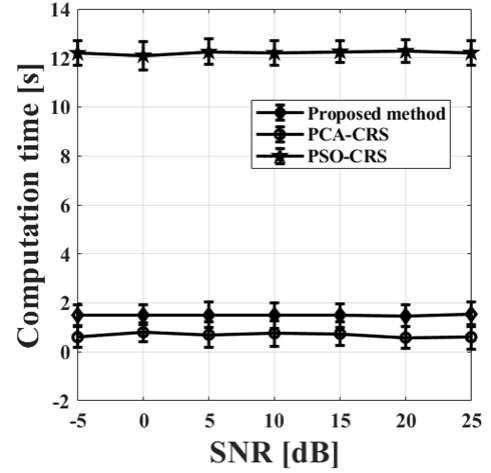


그림 7. SNR 변화에 따른 CRS 기법들의 계산 시간 비교 결과  
Fig. 7. Comparison of computation time to various CRS methods at different SNRs.

가 보존되지 않을 수 있다. 이에 본 논문에서는 회전 및 스케일 관계의 특징을 활용하여 RANSAC 알고리즘에 특정 과정을 추가하였고 이를 통해 이상점 제거뿐 아니라 두 개의 순차적인 ISAR 영상 간의 회전 및 스케일 관계를 만족하는 산란원 매칭 쌍을 획득함을 확인하였다. 최종적으로 획득한 호모그래피를 통해 표적의 회전 속도를 직접적으로 추정한다. 본 논문에서는 모의시험을 수행하여 제안된 기법의 효용성을 검증하였으며, 제안된 기법은 기존의 영상 기반 CRS 기법의 문제를 해결하고 높은 표적 속도 추정 정확도를 보인다. 제안된 ISAR CRS 기법은 CPI 동안 표적이 일정한 각속도로 회전하는 경우에 정확한 회전 속도 추정을 수행하므로, 향후 제안된 기법을 기반으로 비균일 회전 속도 환경에서의 CRS 수행 기법 등 관련된 다양한 연구를 수행할 예정이다.

## References

- [1] C. Özdemir, *Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging with MATLAB Algorithms*, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2012.
- [2] B. S. Kang, J. H. Bae, S. E. Chung, C. H., Kim, and K. T. Kim, "A study on the rotational motion compensation



- method for isar imaging," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 27, no. 1, pp. 67-75, Jan. 2016.
- [3] M. Martorella, "Novel approach for ISAR image cross-range scaling," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 44, no. 1, pp. 281-294, Jan. 2008.
- [4] L. Liu, F. Zhou, M. L. Tao, B. Zhao, and Z. J. Zhang, "Cross-range scaling method of inverse synthetic aperture radar image based on discrete polynomial-phase transform," *IET-Radar, Sonar and Navigation*, vol. 9, no. 3, pp. 333-341, 2015.
- [5] J. Sheng, M. Xing, L. Zhang, and L. Yang, "ISAR cross-range scaling by using sharpness maximization," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 12, no. 1, pp. 165-169, Jan. 2015.
- [6] C. M. Yeh, J. Xu, Y. N. Peng, and X. T. Wang, "Cross-range scaling for ISAR based on image rotation correlation," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 6, no. 3, pp. 597-601, Jul. 2009.
- [7] F. Prodi, "ISAR cross-range scaling using a correlation based functional," in *2008 IEEE Radar Conference*, Rome, May. 2008, pp. 1-6.
- [8] S. H. Park, H. T. Kim, and K. T. Kim, "Cross-range scaling algorithm for ISAR images using 2-D Fourier transform and polar mapping," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 49, no. 2, pp. 868-877, Sep. 2010.
- [9] Z. Xu, L. Zhang, and M. Xing, "Precise cross-range scaling for ISAR images using feature registration," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 11, no. 10, pp. 1792-1796, Oct. 2014.
- [10] M. S. Kang, J. H. Bae, B. S. Kang, and K. T. Kim, "ISAR cross-range scaling using iterative processing via principal component analysis and bisection algorithm," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 64, no. 15, pp. 3909-3918, Aug. 2016.
- [11] B. S. Kang, J. H. Bae, K. T. Kim, and E. Yang, "ISAR cross-range scaling for a maneuvering target," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 25, no. 10, pp. 1062-1068, Oct. 2014.
- [12] D. G. Lowe, "Distinctive image features from scale-invariant keypoints," *International Journal of Computer Vision*, vol. 60, no. 2, pp. 91-110, Nov. 2004.
- [13] M. A. Fischler, R. C. Bolles, "Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography," *Communications of the ACM*, vol. 24, no. 6, pp. 381-395, Jun. 1981.

유 보 현 [포항공과대학교/석·박사통합과정]

<https://orcid.org/0000-0003-1256-3866>



2015년 2월: 포항공과대학교 전기전자공학과 (공학사)

2015년 3월~현재: 포항공과대학교 전기전자공학과 석·박사 통합과정

[주 관심분야] 레이더 신호처리, SAR/ISAR 이미징

이 경 민 [포항공과대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-1999-5242>



2018년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)

2020년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 공학석사

2020년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 박사과정

[주 관심분야] 레이더 신호처리, SAR/ISAR 이미징

이 인 혁 [포항공과대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0001-7112-1318>



이미징

2019년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)

2021년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)

2021년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 박사과정

[주 관심분야] 레이더 신호처리, SAR/ISAR

김 경 태 [포항공과대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-1200-5282>



1994년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)

1996년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)

1999년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)

2002년 3월~2011년 2월: 영남대학교 전

자공학과 교수

2011년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 교수

2012년 9월~2017년 12월: 레이더/IR 표적식별 특화연구실실장

2018년 1월~현재: 무인감시정찰기술연구센터장

2019년 4월~현재: 차세대 영상레이더시스템 연구센터장

2020년 11월~현재: 차세대 국방융합기술 연구센터장

[주 관심분야] 레이더 신호 처리 및 영상, 레이더 표적인식 및 패턴인식, 전자기수치해석 및 RCS 측정