

서명 도용 방지를 위한 FMCW MIMO 레이다 기반 3 차원 전자서명 시스템 구현

이제용, 윤영선, 백인찬, 김동원, 박주하, 신원재
고려대학교 전기전자공학부

{jaeyong712, yos3280, baeginchan789, starvade0513, juha, wjshin}@korea.ac.kr

FMCW MIMO Radar-Based 3D Signature System for Signature Forgery Prevention

Jaeyong Lee, Youngsun Yoon, Inchan Baek, Dongwon Kim, Juha Park, and Wonjae Shin
School of Electrical Engineering, Korea University

요약

최근 서명 위조로 인한 재산적 피해가 다수 보고되어 사회적 문제가 되고 있다. 전통적 서명은 2 차원 이미지 데이터를 기반으로 본인 확인을 수행하기 때문에 높은 해상도의 사진을 확보하면 손쉽게 위조가 가능한 한계가 있다. 이에 지문 인식 기술이 그 대안으로 활발히 활용되고 있으나, 생체 데이터를 활용한다는 측면에서 프라이버시 문제가 있으며 접촉식 인증이라는 점에서 위생 측면의 문제가 있다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결할 수 있는 비접촉(contactless) 방식의 Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW) 레이다 기반 3 차원 전자서명 시스템을 제안하고 테스트베드 구현 결과를 제시한다. 구체적으로, 3 차원 궤적 정밀 추정을 위해 Multiple Signal Classification (MUSIC) 알고리즘을 활용하고 도플러 천이를 활용한 궤적 보간법을 도입한다. 본인 확인을 위해서는 Dynamic Time Warping (DTW) 기법을 활용하며, 이때 서명 시의 속도, 입체 궤적과 같은 동적 정보를 동시에 활용하여 높은 보안성의 인증 방식 구현을 추구한다. 테스트베드 구현을 통해 제안하는 3 차원 전자서명 시스템이 비접촉 서명을 통해 본인 여부를 확인할 수 있음을 검증한다.

I. 연구 배경 및 목적

2024 년 미국 연방수사국에 따르면, 서명 위조를 통한 부동산 사기 범죄가 9,359 건 보고되었으며 재산적 피해는 약 1.7 억 달러에 달한다 [1]. 이와 같이, 전통적 방식 기반 서명의 취약성을 악용하는 사기 범죄가 사회적 문제가 되고 있다. 서명 데이터의 취약성은 2 차원 이미지 데이터의 한계로부터 기인한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 지문 및 홍채 인식 등 생체 정보를 활용한 기법들이 활발히 사용되고 있으나, 생체 데이터를 활용한다는 측면에서 프라이버시 문제에서 자유롭지 않다. 본 논문에서는 Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW) 레이다 기반의 3 차원 전자서명 시스템을 제안한다. 레이다를 활용하여 일정 시간 동안 서명자의 손끝 궤적을 추정하고, 3 차원 궤적뿐 아니라 서명 시의 속도 및 가속도 데이터 또한 동시에 활용하여 높은 정밀도의 본인 인증 여부 판별을 수행할 수 있다. 높은 정밀도의 궤적 추정을 위해 Multiple Signal Classification (MUSIC) 알고리즘으로 손끝의 각도를 추정하고 도플러 천이를 활용한 궤적 보간법을 활용해 sub-bin 수준의 거리 추정 성능을 달성한다. 이후 Dynamic Time Warping (DTW) 을 통한 서명 데이터의 사후 처리를 통해 본인 여부를 판별한다. 이러한 과정을 실제 테스트베드로 구현하여 제안하는 3 차원 전자서명 시스템이 효과적인 차세대 비 접촉 본인 확인 기술임을 검증한다.

II. FMCW 레이다 기반 3 차원 서명 궤적 추정 및 유사도 연산

본 연구에서는 다중 안테나를 활용하는 FMCW Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) 레이다를 가정한다. 충분히 높은 주파수

대역과 낮은 수준의 클러터 강도를 고려하여 점 타겟(point target)을 가정한다. 이때, 송신된 특정 chirp 신호가 목표물에 반사되어 수신된 신호는 안테나 별로 상이한 위상천이를 겪고, 다음과 같이 모델링 된다.

$$\mathbf{x}[\ell] = \mathbf{a}(\theta, \phi) s[\ell] e^{j2\pi f_d \ell / F_s} + \mathbf{n}[\ell], \quad (1)$$

여기서, $s[\ell]$ 는 손 끝에서 반사된 신호, $\mathbf{n}[\ell]$ 는 잡음 벡터, $\mathbf{x}[\ell]$ 는 수신 신호 벡터이며 $\mathbf{a}(\theta, \phi)$ 는 조향 벡터이다. $\ell \in \{1, \dots, L\}$ 은 샘플 인덱스, L 은 샘플 수, f_d 는 도플러 주파수, F_s 는 샘플링 주파수이며 θ, ϕ 는 각각 목표물의 방위각, 고도각이다. Chirp 신호를 반복적으로 송신 및 반사 신호를 수신하여 3 차원 궤적을 추정한다. 우선 그림 1 과 같이, Fast Fourier Transform (FFT)를 활용하여 시간 영역의 신호를 거리(range) 영역으로 변환한다. 이후, 노이즈 레벨에 따라 능동적인 임계값을 설정하는 Ordered Statistics-Constant False Alarm Rate (OS-CFAR) 을 활용하여 목표물이 존재하는지 탐지(detection)한다. 만약 목표물이 존재한다면, 공분산 행렬을 $\mathbf{R}_x = \sum_{\ell=1}^L \mathbf{x}[\ell] \mathbf{x}[\ell]^H$ 과 같이 추정한다. 이후, 추정된 공분산 행렬 (sample covariance matrix)에 고윳값 분해를 적용하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{R}_x = [\mathbf{u}_s \quad \mathbf{u}_n] \begin{bmatrix} \sigma_s^2 & \mathbf{0}^T \\ \mathbf{0} & \Sigma_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_s \\ \mathbf{u}_n^H \end{bmatrix}. \quad (2)$$

이후, 신호와 잡음 부공간의 직교성을 활용하여, 다음과 같이 목표물의 방향을 높은 정밀도로 추정 가능하다.

$$(\hat{\theta}, \hat{\phi}) = \underset{\theta, \phi}{\operatorname{argmax}} \frac{1}{\mathbf{a}(\theta, \phi)^H \mathbf{u}_n \mathbf{u}_n^H \mathbf{a}(\theta, \phi)}. \quad (3)$$

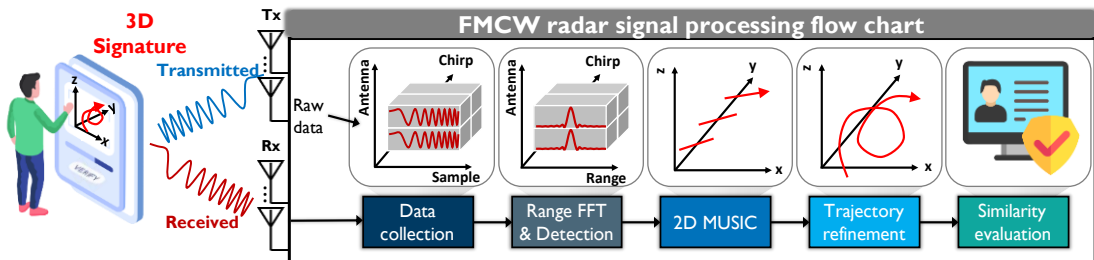


그림 1. 제안하는 3 차원 전자서명 기술의 신호 처리 흐름도

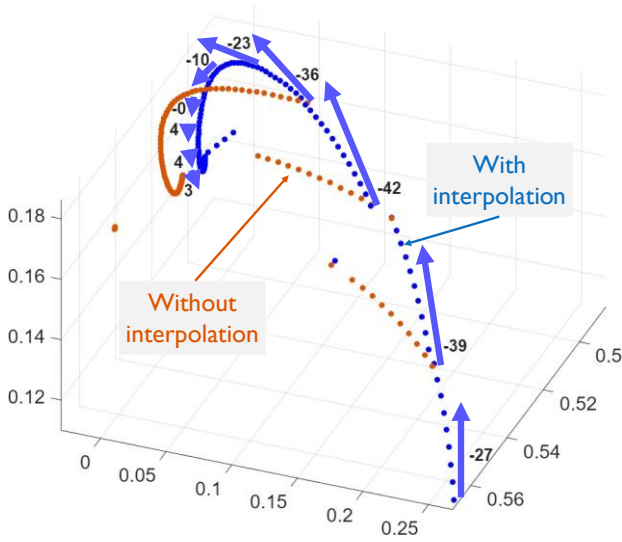


그림 2. 제안하는 3 차원 궤적 보간법 예시. 화살표의 길이는 속력을 의미함.

위와 같은 절차를 거쳐 3 차원 궤적을 추정할 수 있다. 이때, FFT 를 이용한 거리 추정에서 거리 해상도는 다음 수식과 같이 range bin 의 간격으로 제한되기에 추정된 궤적이 불연속적이라는 한계가 있다.

$$\Delta R_{bin} = \frac{c}{2S} \frac{F_s}{L} \quad (4)$$

여기서, ΔR_{bin} 은 거리 해상도이며, S 는 chirp 신호의 주파수 변화율이고, c 는 빛의 속도이다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해, 도플러 정보를 추가적으로 활용하여 보다 정밀한 궤적으로 refinement 하는 기법을 제안한다. 목표는 이 bin 과 bin 사이를 채워 sub-bin 수준의 거리를 추정하는 것이며, 이를 위해 본 논문에서는 프레임별 도플러 보간법을 제안한다.

$$s_{bin} = \sum_{k=a}^b v_d[k] T_f, \alpha = \frac{\Delta R_{bin}}{s_{bin}}, \beta = \begin{cases} \frac{s_{bin} - s_{bin,min}}{s_{bin,max} - s_{bin,min}}, & \end{cases} \quad (5)$$

$$R[k] = R[k-1] + v_d(k) T_f \alpha \beta. \quad (6)$$

여기서, $k \in \{1, \dots, f_{bin}\}$ 는 프레임 인덱스, v_d 는 도플러 속도, T_f 는 프레임 주기, s_{bin} 은 한 range bin 에서 프레임 변위의 총합을 의미한다. 본 연구에서는 프레임을 31 개의 루프에 구성하며, Time Division Multiplexing (TDM) 방식을 사용하여 각 루프에 Tx 당 하나, 총 3 개의 chirp 가 존재한다. 시작 위치 $R(0)$ 는 이전, 다음 bin 비교로 선택된 range bin 경계로 초기화된다. α 는 s_{bin} 을 ΔR_{bin} 으로 정규화하는 계수이며, β 는 bin 이 $\{n, n+1, n\}$ 순으로 배열될 경우 궤적의 반환지점을 s_{bin} 과 비례하도록 하는 계수이다. 이로써 range 양자화로 생기는 계단형 궤적을 sub-bin 수준의 거리추정으로 매끈하게 복원하고, 특히 방향전환 구간과 궤적 종료 구간에서의 반환점 및 종료지점을 정밀하게 결정한다. 이렇게 입력된 궤적을 기반으로, 기준(reference) 서명과 입력된 서명의 유사성을 측정한다. 유사성 측정에는 시계열 데이터 간 유사성 측정의 대표적 기법인 DTW 알고리즘을 활용하여 두 시계열 데이터 간의 최소 누적 거리를 기반으로 유사성을 연산, 본인 확인 여부를 판별한다.

III. 테스트베드 구현 및 실험 결과

Texas Instrument 사의 IWR6843ISK-ODS 를 활용하여 테스트 베드를 구현하였다 [2]. 실험 상황은 그림 3 과 같다. 3 개의 송신단과 4 개의 수신단, 60 ~ 64 GHz 의 주파수 대역을 사용한다. 정밀한 각도 추정을 위하여 조향 벡터 캘리브레이션을 수행하였다. 클러터의 영향을 최소화하기 위해 전파 흡수체로 구성된 상자 내에 손을 넣어 3 차원 서명을 수행하고 레이더가 해당 서명의 궤적을 추정한다. 또한, 남아있는 배경잡음의 영향을 최소화하기 위해 센싱 타겟이 없는 상황에서의 수신 신호를 측정하여 추후 측정값에서 제거하였다. MUSIC 알고리즘의 grid-search 로 인한 연산 복잡도를 최소화하기 위해, 전 각도 범위에서의 search 가 아

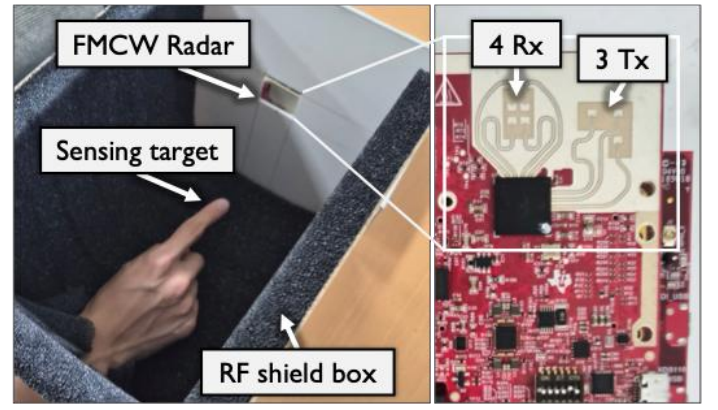


그림 3. 3 차원 전자서명 테스트베드, “Rx” 와 “Tx” 는 각각 송신안테나와 수신안테나를 의미함. 앞의 계수는 각각 3 개의 Tx 안테나와 4 개의 Rx 안테나를 의미함.

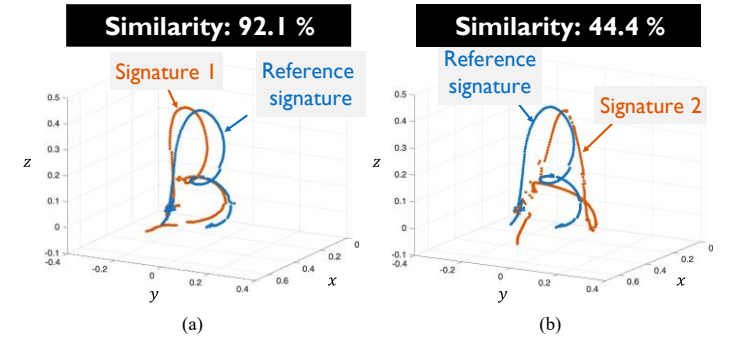


그림 4. 유사도 판별 결과. (a): 레퍼런스와 동일한 서명이 입력된 경우, (b): 레퍼런스와 상이한 서명이 입력된 경우.

닌 이전에 추정된 각도에서 $\pm 3^\circ$ 범위 내에서 search 를 수행하였다. 실험 결과, 전파 흡수 소재를 이용한 상자 내에서 측정을 수행하여도 전파 흡수 성능이 충분치 않을 뿐 아니라 손의 전파 반사율이 높지 않아 원활한 측정이 어려웠다. 이에, 대안으로 충분히 배경잡음이 적은 넓은 실내 공간에서 대체 실험을 수행하였다. 이를 통해 측정된 3D 서명 궤적을 저장 후 DTW 알고리즘을 통해 유사도를 비교하였다. 그림 4 는 3 차원 공간에서 알파벳 “B” 형태의 레퍼런스 서명을 저장시켜 둔 뒤, 각각 “B”, “A”라는 서명을 입력시켜 유사도 판정 결과를 나타낸다. 레퍼런스와 동일한 알파벳 서명을 입력한 경우에 그렇지 않은 경우보다 높은 유사도를 나타낸다.

IV. 결론 및 추후 연구 방향

본 연구에서는 FMCW MIMO 레이더 기반의 3 차원 전자서명 시스템을 제안하고 테스트베드를 통해 실증하였다. 추후 다양한 실험데이터를 기반으로 유사도를 통해 본인확인 여부를 높은 정밀도로 추정할 수 있는 detection 기법과 유사도 연산 시 궤적뿐 아니라 속도 등 다양한 데이터를 이용하는 기법에 대한 연구가 필요하다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(RS-2025-0056209)과 정보통신기획평가원(RS-2025-00436887)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] “Internet Crime Report,” Federal Bureau of Investigation (FBI), Washington D.C., USA. Accessed: Oct. 2, 2025. [Online]. Available: https://www.ic3.gov/AnnualReport/Reports/2024_IC3_Report.pdf
- [2] Texas Instruments. “IWR6843ISK-ODS: mmWave Sensor Evaluation Module.” TI.com. Accessed: Oct. 2, 2025. [Online]. Available: <https://www.ti.com/tool/IWR6843ISK-ODS>