차량용 레이더의 실시간 물체 추적을 위한 연산 효율적 알고리즘 연구

김소람, 박정훈, 문건휘, 김성철
서울대학교 전기정보공학부 뉴미디어통신공동연구소
{srkim523, hoon0337, mgh6325, sckim}@maxwell.snu.ac.kr

A Study on the Computational Efficient Algorithm for Real-Time Object Tracking in Automotive Radar

Soram Kim, Jeong-Hoon Park, Gunhwi Moon, Seong-Cheol Kim
Department of Electrical and Computer Engineering and INMC, Seoul National University

요 약

본 논문은 차량용 레이더 시스템을 위한 연산 효율적인 실시간 물체 추적 알고리즘을 제안한다. 차량용 레이더의 짧은 처리 시간을 고려하여 연산량이 상대적으로 적은 거리, 속도, 각도 추정 신호처리 알고리즘을 사용하였으며, 고정 이득 $\alpha-\beta$ 필터와 지수 가중 이동 평균 필터를 사용하여 연산량을 줄인 실시간 추적 방법을 제안하였다. 실험 결과로부터 필터의 이득을 실험적으로 최적화할 경우 상대적으로 적은 계산량으로도 물체 추적이 가능함을 알 수 있었다.

Ⅰ. 서론

안전한 자율주행 시스템을 위해서는 주변 환경의 객체를 인식하고 그것의 위치를 감지해 상황을 스스로 판단하고 행동하는 것이 필요하다. 자율주행의 외부 환경 인식 센서로 카메라, 라이다, 레이더 등이 사용되고 있으며, 그 중에서도 레이더는 다른 센서에 비해 날씨 변화와 빛이 없는 환경에 강인하고 비교적 적은 비용이 든다는 장점이 있다 [1].

본 논문에서는 차량용 FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) 레이더의 실시간 물체 감지 및 추적을 위한 연산 효율적인 알고리즘을 제안한다. 데이터 처리의 실시간성을 요구하는 차량용 레이더 시스템을 고려하여 연산량이 상대적으로 적은 타겟 추정 신호처리 알고리즘을 사용하였으며, 고정 이득을 이용한 $\alpha-\beta$ 필터와 지수 가중 이동 평균 필터를 사용해, 상대적으로 적은 연산량으로 실시간 물체 추적이 가능하도록 하였다. 제안된 필터링 방법에서는 추적 성능을 높이기 위하여 거리 정보를 보정할 때 이전 거리 정보뿐만 아니라 속도 정보를 같이 이용하였다.

제안된 실시간 타겟 추적 시스템의 성능을 검증하기 위하여 77GHz FMCW 레이더를 이용하여 실외 공터에서 실험을 진행하였고, 성능을 분석 하였다.

Ⅱ. 본론

2.1 타겟의 거리, 속도, 각도 추정을 위한 신호처리 방법

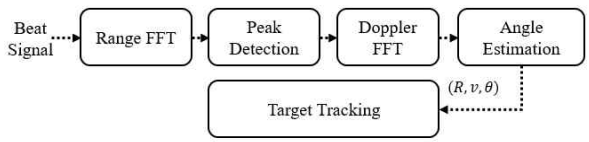

그림 1. 타겟 추적 과정

본 연구에서의 타겟 추적을 위한 신호처리 과정을 그림1에 나타내었다. FMCW 레이더에서 거리와 속도를 동시에 탐지하기 위한 신호처리 방법으로, ADC 샘플 축과 처프 신호 축으로 두 번 FFT를 하는 알고리즘이 사용되고 있다. 하지만 이 알고리즘은 타겟이 존재하지 않는 거리와 속도 영역에서도 2D FFT 연산을 하여 많은 계산량이 요구된다. 본 논문에서는 Range FFT에서 거리별 최고 PSD (Power Spectrum Density) 값을 가지는 셀들을 추출하여, 추출된 거리 영역에 해당하는 셀만 처프 신호 축으로 쌓았다. 이후 해당 셀들에 대해서만 Doppler FFT를 하여 적은 연산량으로 거리와 속도를 추정하는 타겟 탐지 방법을 사용하였다. 타겟의 각도를 추정하기 위해서는 인접 안테나 사이의 페이즈 차이를 이용하는데, 상대적으로 적은 연산량을 가지는 각도 추정 방식인 FFT 알고리즘을 이용해 타겟의 각도를 추정하였다.

2.2 타겟 추적 필터

일반적으로 물체 추적 필터는 동적 이득 필터와 고정 이득 필터로 나누어진다. 널리 사용되는 동적 이득 필터로는 칼만 필터가 있으며, 레이더의 비선형성을 극복하기 위한 방안으로 확장형 칼만 필터와 파티클 필터 등이 추적 시스템에 응용되어 왔다 [2]. 그러나 동적 이득 필터는 시간 간격마다 이득을 반복적으로 계산하기 때문에, 데이터 처리의 실시간성을 요구하는 차량용 레이더 시스템에서는, 보다 계산량이 적고 효율적인 필터링 방법이 필요하다.

본 논문에서는 거리와 속도 정보를 보정하기 위한 방법으로, 상대적으로 적은 연산량을 가지는 고정 이득 $\alpha-\beta$ 필터를 사용했다. 사용된 필터링 방법은 예측 단계와 갱신 단계로 이루어진다.

예측 단계는 식(1),(2)와 같이 표현된다.

$$x(k)=\bar{x}(k-1)+\Delta T v(k-1) \quad (1)$$

$$v(k)=\bar{v}(k-1) \quad (2)$$

$\bar{x}(k)$, $\bar{v}(k)$는 각각 k번째 프레임에서의 필터링 된 거리와 속도를 나타내며 $x(k)$, $v(k)$는 예측된 거리와 속도 값을 나타낸다. 본 실험에서는 한 프레임마다 측정값이 갱신되므로 갱신 주기 ΔT는 $80ms$으로 설정되었다.

다음으로 갱신 단계는 식(3),(4)와 같이 예측값과 측정값의 오차를 이용

하여 구해진다. 식의 $\hat{x}(k), \hat{v}(k)$는 각각 k번째 프레임에서의 측정된 거리와 속도 값을 나타낸다.

$$\bar{x}(k) = x(k) + \alpha(\hat{x}(k) - x(k)) \quad (3)$$

$$\bar{v}(k) = v(k) + \beta_1(\hat{v}(k) - v(k)) + \beta_2/\Delta T(\hat{x}(k) - x(k)) \quad (4)$$

제안된 필터링 방법에서는 속도 정보를 보정하기 위하여 속도 정보의 예측값과 측정값의 오차를 β_1의 이득으로 반영하였고, 속도의 오차뿐만 아니라 거리 정보의 예측값과 측정값 사이의 오차를 β_2의 이득으로 이중으로 반영하여 보정하였다. 고정 이득 β_1, β_2 가 실험적으로 결정되었고 $\beta_1 + \beta_2 \leq 1$ 을 만족하도록 결정되었다. 거리 정보를 필터링하기 위해서는, 거리의 예측값과 측정값의 오차를 α의 이득으로 반영하였다.

각도 정보는 지수 가중 이동 평균 필터를 이용해 보정되었다. 이동 평균 필터는 지정된 개수의 최근 측정값을 이용해 값을 보정하는 방식으로, 계산 속도가 빠르고 효율적인 장점이 있다. 사용된 식은 (5),(6)과 같다.

$$\Theta(k) = \gamma\Theta(k-1) + (1-\gamma)\theta(k) \quad (5)$$

$$\Theta(k) = \frac{\Theta(k)}{1-\gamma^k} \quad (6)$$

$\Theta(k)$는 필터링 된 각도 값을 나타내고, 이전의 값 $\Theta(k-1)$과 새로 측정된 값 $\theta(k)$를 얼마의 비중으로 반영할지를 지수 가중 상수 γ을 통해 결정한다. $\frac{1}{1-\gamma^k}$는 초기의 오차 값을 보정 하기 위해 곱해졌다.

2.3 실험 환경

실험은 그림2와 같은 공터에서 진행되었으며, 지정된 경로를 따라 반시계 방향으로 이동하는 사람을 레이더로 탐지해 거리, 속도, 각도 성분을 추정하였다. 실험을 위해 그림3과 같은 Texas Instruments사의 77GHz FMCW 레이다 AWR2243을 사용하였으며, 사용된 파라미터와 거리 및 속도 분해능, 최대 탐지 거리 및 속도는 표1과 같다. 실험에는 3개의 송신 안테나가 사용되었으며, TDM (Time Division Multiplexing) 방식을 사용해 처프 신호를 송신하였다. 실험에 사용된 α, β_1, β_2, γ 값은 각각 0.5, 0.25, 0.25, 0.5로 설정되었다.

그림2. 실험 환경

그림3. AWR2243 레이더

파라미터	값	파라미터	값
중심주파수	77 GHz	측정 프레임 수	200
대역폭	767 MHz	프레임 간 간격	80 ms
송수신 안테나 수	3×4	거리 분해능	0.195 m
처프 신호 간격	480 us	최대 탐지 거리	49.9 m
사용된 처프 신호 수	128	속도 분해능	0.0944 m/s
한 처프의 샘플수	256	최대 탐지 속도	2.01 m/s

표1. 레이더 스펙

2.4 실험 결과

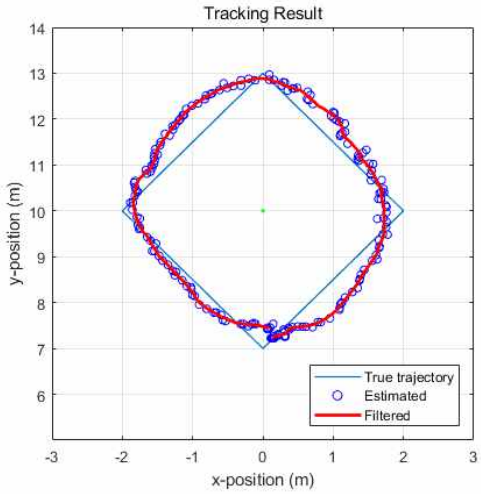

그림4. 실시간 타겟 위치 추정 결과

그림4는 실시간으로 보정된 거리 정보와 12개의 가상 안테나 배열을 이용하여 추정된 각도 정보를 이용하여 타겟 이동 경로를 나타낸 것이다. 실험 결과를 통하여 제안된 $\alpha-\beta$ 필터링 방법과 지수 가중 이동 평균 필터를 사용했을 때에 적은 계산량으로도 경로를 잘 추적하였음을 확인할 수 있었다. 제안된 $\alpha-\beta$ 필터링 방법에서는 거리 정보를 보정할 때 이전 거리 정보뿐만 아니라 속도 정보를 같이 이용해 보정하였고, 이를 통해 추적 성능을 높일 수 있었다.

Ⅲ. 결론

본 논문에서는 차량용 레이더 시스템을 위한 실시간 타겟 추적 알고리즘을 차량 환경의 맞게 설계하였고 실험을 통해 이를 검증하였다. 차량용 레이더의 짧은 처리 시간을 고려하여 타겟의 거리, 속도, 각도 정보를 추정하는 신호처리 알고리즘을 사용하였고, 고정 이득 $\alpha-\beta$ 필터와 지수 가중 이동 평균 필터를 사용하여 연산량을 줄인 실시간 추적 방법을 제안하였다. 실험 결과로부터 필터의 이득을 실험적으로 최적화할 경우 상대적으로 적은 계산량으로도 타겟 추적이 가능함을 알 수 있었다.

향후 다양한 환경과 시나리오에서의 실험 데이터를 취득하여 계산량이 적고 정확도가 높은 차량용 레이더 추적 알고리즘에 대해 연구할 것이며, 다양한 필터링 방법들에 대한 성능을 비교해볼 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 삼성전자의 지원(IO210202-08366-01)을 받아 수행된 결과임

참 고 문 헌

[1] Patole, S. M., Torlak, M., Wang, D., & Ali, M. (2017). Automotive radars: A review of signal processing techniques. IEEE Signal Processing Magazine, 34(2), 22-35.

[2] Shen, X., Zheng, H., & Feng, X. (2020, December). A Novel FMCW Radar-Based Scheme for Indoor Localization and Trajectory Tracking. In 2020 IEEE 6th International Conference on Computer and Communications (ICCC) (pp. 298-303). IEEE.