

미결함 환경에서 단일 타겟 센싱을 위한 무결성 모니터링

양현호, 김효원

충남대학교 전자공학과

hyunho.yang00@o.cnu.ac.kr, hyowon.kim@cnu.ac.kr

Integrity Monitoring for Single-Target Sensing in Fault-Free Environments

Hyunho Yang and Hyowon Kim

Department of Electronics Engineering, Chungnam National University

요약

본 논문에서는 미결함환경에서 단일 타겟 센싱을 위한 무결성 모니터링 기법을 제안한다. 이동통신 기술이 발전하면서 위치에 대한 엄중한 무결성을 목표하고 있으며, 이를 분석하기 위해 RAIM(receiver autonomous integrity monitoring)는 필수적이다. 기존 Bayesian RAIM은 알려지지 않은 매개변수들이 많아질수록 계산량이 기하급수적으로 증가한다. 이를 극복하기 위해 사후 확률 밀도 기반 신뢰성 전파로 구현한 타겟 센싱 및 무결성 분석 기법을 제안한다. 시뮬레이션을 통해 타겟 무결성 위험도(TIR: target integrity risk)의 변화에 따른 보호 수준(PL: protection level)을 계산하고 센싱 및 무결성을 검증한다. 각 TIR에 따른 측위 성능을 확인하며, TIR이 작아질수록 높은 PL 산출로 안정적인 무결성을 제공할 수 있음을 확인하였다.

I. 서 론

이동통신 기술이 발전함에 따라 자동화 공장, 자율 주행 차량 등 위치 정보가 중요한 분야 또한 빠르게 발전하고 있다. 정확한 위치 정보를 위해 관련 분야는 고정밀도 및 저지연성뿐만 아니라 엄중한 무결성까지 목표한다[1-3]. 위치 정보에 대한 무결성을 분석하기 위해 RAIM(receiver autonomous integrity monitoring) 기술은 핵심적인 역할을 한다.

RAIM을 구현하기 위해 사후 확률 밀도 기반의 Bayesian RAIM이 제안되었다[4]. 기존의 Bayesian RAIM은 몬테카를로 방법(파티클 필터, 갑스 샘플링)을 활용하였지만, 이는 알려지지 않은 매개변수들이 많아질수록 계산량이 기하급수적으로 증가하여 복잡한 시스템으로 확장하는데 한계가 존재한다[4], [5]. 따라서 Bayesian RAIM의 효율적인 구현을 가능하게 하는 연구가 필수적이다.

본 논문에서는 RAIM을 Bayesian 사후 확률 밀도를 활용하여 문제를 구성하였고, 이를 신뢰성 전파(BP: belief propagation)로 구현한 단일 타겟 센싱 및 무결성 분석 기법을 제안한다. 타겟 무결성 위험도(TIR: target integrity risk)의 변화에 따른 보호 수준(PL: protection level)을 계산하고, 무결성 및 센싱의 성능을 검증한다.

II. 본 론

2차원 환경에서 1개의 타겟이 존재하며, S 개의 센서가 존재한다. 각 센서에는 결합이 발생하지 않으며, 각 센서가 측정한 정보들을 활용하여 단일 타겟 센싱을 진행한다. 타겟의 상태벡터는 $\mathbf{x}_k = [\mathbf{p}_k^\top, \mathbf{v}_k^\top]^\top$, $\mathbf{p}_k = [x_k, y_k]^\top$ 및 $\mathbf{v}_k = [v_{x,k}, v_{y,k}]^\top$ 는 각각 타겟의 위치 및 속도이며, 타겟의 동적 모델은 다음과 같이 정의한다.

$$\dot{\mathbf{x}}_k = \mathbf{F}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{n}_k, \quad (1)$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{2 \times 2} & \Delta k \mathbf{I}_{2 \times 2} \\ \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{I}_{2 \times 2} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$\mathbf{n}_k \sim N(\mathbf{0}_{4 \times 1}, \mathbf{Q})$ 는 프로세스 오차, Δk 는 시간 간격이다.

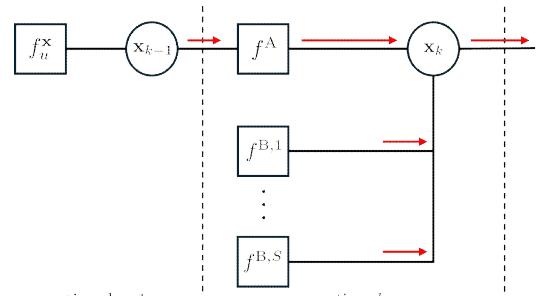


그림 1. 결합 사후 확률 밀도 기반 요소 그래프

시간 k 에서 센서 s 의 측정값 모델은 다음과 같다.

$$\mathbf{z}_k^s = \mathbf{H}\mathbf{x}_k - \mathbf{x}^s + \mathbf{r}_k, \quad (3)$$

$$\mathbf{H} = [\mathbf{I}_{2 \times 2}, \mathbf{0}_{2 \times 2}], \quad (4)$$

\mathbf{x}^s 는 센서의 위치이며, $\mathbf{r}_k \sim N(\mathbf{0}_{2 \times 1}, \mathbf{R})$ 은 측정값 오차이다.

시간 $k-1$ 에서 k 까지 결합 사후 확률 밀도는 $f(\mathbf{x}_{k-1:k} | \mathbf{z}_k)$ 이며 다음과 같이 인수분해한다.

$$f(\mathbf{x}_{k-1:k} | \mathbf{z}_k) \propto f(\mathbf{z}_k | \mathbf{x}_{k-1:k}) f(\mathbf{x}_{k-1:k}) \quad (5)$$

$$= f(\mathbf{x}_{k-1}) f(\mathbf{x}_k | \mathbf{x}_{k-1}) \prod_{s=1}^S \ell(\mathbf{z}_k^s | \mathbf{x}_k), \quad (6)$$

인수분해된 결합 사후 확률 밀도를 활용한 요소 그래프는 그림 1과 같고, 요소 그래프에 기반하여 타겟 위치 \mathbf{x}_k 에 대한 신뢰성을 계산한다.

위치 측정 결과의 무결성을 분석하기 위해서 요구된 TIR 조건에 따른 PL을 계산하며 다음과 같이 정의한다.

$$PL_{1D,i} = \min \{ r | \Pr\{|\mathbf{e}_i| > r\} < w_i P_{TIR} \}, \quad (7)$$

$$PL_{nD} = \left(\sum_{i=1}^n PL_{1D,i}^2 \right)^{\frac{1}{n}}, \quad (8)$$

$|\mathbf{e}_i|$ 은 i 축에서의 위치 오차 벡터, w_i 는 i 축에 대한 가중치, P_{TIR} 은 시스템에서 요구하는 TIR 확률이다. n 차원 PL은 i 축 PL들의 n 차원 벡터 크기이다.

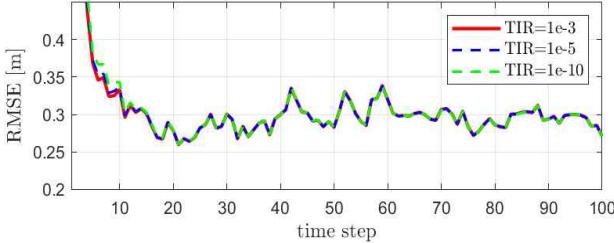


그림 2. P_{TIR} 변화에 따른 RMSE

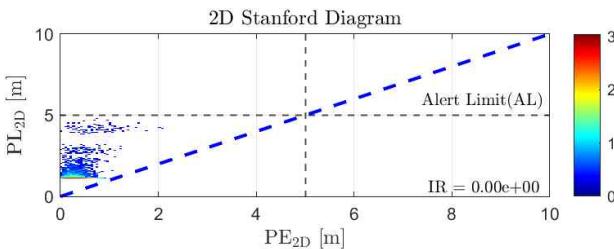


그림 3. $P_{TIR} = 10^{-3}$ 의 스텐퍼드 다이어그램

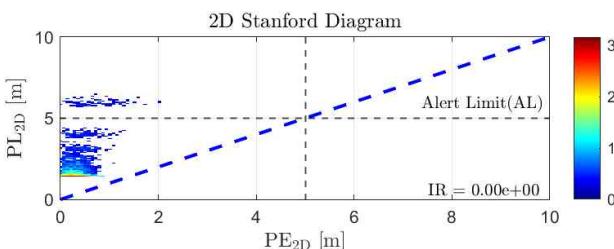


그림 4. $P_{TIR} = 10^{-5}$ 의 스텐퍼드 다이어그램

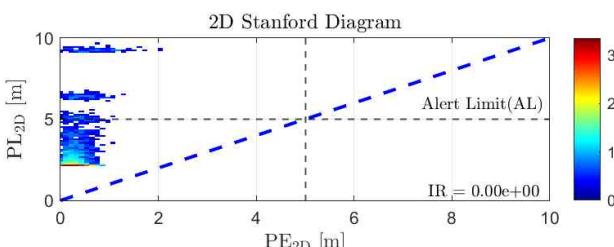


그림 5. $P_{TIR} = 10^{-10}$ 의 스텐퍼드 다이어그램

III. 시뮬레이션 및 성능 평가

시뮬레이션은 시간 간격 $\Delta k = 1$ s, 총 시간 $K = 100$ 의 과정을 거쳐 수행하였다. 모든 위치 및 속도에 대한 단위는 각각 m, m/s이다. 초기 타겟의 분포는 네트워크 중앙 $\mathbf{x}_0 = [50, 50, 1, 1]^T$ 에서 공분산 $\Sigma_0 = \text{diag}(60^2\mathbf{I}_{2 \times 2}, \mathbf{0}_{2 \times 2})$ 으로 설정하였다. 타겟의 동적 모델의 프로세스 오차 공분산 $\mathbf{Q} = \text{diag}(\sigma_p^2\mathbf{I}_{2 \times 2}, \mathbf{0}_{2 \times 2})$, $\sigma_p = 0.1$ m 이다. 센서는 3개이며, 센서 s 의 측정값 오차 공분산 $\mathbf{R} = \mathbf{I}_{2 \times 2}$ 로 설정하였다. $w_i = 0.5$ 이며 이분법을 활용하여 2차원 PL을 계산하고, 무결성 분석을 위한 경보 한계(AL: alert limit)는 5 m로 설정하였다. 단일 타겟 센싱의 무결성 분석을 위한 무결성 위험도(IR: integrity risk)를 다음과 같이 계산한다.

$$IR_{2D} = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K I(PE_{2D}^{\{m,k\}} > PL_{2D}^{\{m,k\}})}{MK} \quad (9)$$

PE_{2D} 는 실제 2차원 타겟 위치 오차이며 M 은 몬테카를로 시행 횟수이다. $I(\cdot)$ 은 IR 상태 표시 함수이며, $PE_{2D}^{\{m,k\}} > PL_{2D}^{\{m,k\}}$ 일 때 1, 그 외에는 0을 나타낸다. 타겟 위치의 BP를 칼만 필터로 구현하였으며, 성능

평가를 위해 몬테카를로 시뮬레이션을 100회 수행한다.

그림 2는 TIR의 변화에 따른 타겟 센싱 성능에 대한 평균 제곱근 오차(RMSE: root mean square error) 결과이다. 초기에 TIR에 따른 타겟 센싱의 성능 차이를 확인할 수 있으며, 이는 초기 타겟의 위치에 대한 불확실성에 의해 발생하고, 이후 모든 TIR 조건에서 센싱 오차는 0.25 m ~ 0.35 m로 수렴한다.

그림 3-5는 스텐퍼드 다이어그램으로 2차원 타겟 위치 오차에 따른 PL의 분포를 나타내며, $P_{TIR} = 10^{-3}, 10^{-5}, 10^{-10}$ 일 때 PL 및 IR에 대한 결과이다. TIR이 작아질수록 무결성을 위한 요구 조건이 강화되기 때문에 PL이 절차 커지는 것을 확인할 수 있다. 또한, 모든 TIR 조건에서 IR는 0으로 산출되었으며, 증가한 PL을 통해 해당 시스템의 무결성을 확보할 수 있음을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 결함이 없는 환경에서 신뢰성 전파 기법 기반 타겟의 위치 추정 및 무결성을 확인하였다. 시뮬레이션을 통해 TIR의 변화에도 정밀한 센싱 성능을 가지며, TIR이 작아질수록 PL은 증가하고, 이는 시스템의 무결성을 확보할 수 있는 핵심적인 역할임을 확인하였다. 하지만 실제 결함 환경에서 안정적인 무결성을 보장하기 위해서는 추가적인 고려가 필요하다. 제안하는 신뢰성 전파 기반 위치 추정 및 무결성 검증 기법은 다양한 결함 환경에서도 신뢰성 높은 무결성 확보에 기여할 것으로 기대한다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 한국연구재단 기초연구사업(No. RS-2025-25415939), 한국연구재단 대학기초연구소지원사업(G-LAMP)(No. RS-2025-25442707), 그리고 한국연구재단(No. NRF-2023R1A2C3002890)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참 고 문 현

- [1] A. Behravan *et al*, “Positioning and sensing in 6G: Gaps, challenges, and opportunities,” *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 18, no. 1, pp. 40–48, Mar. 2023.
- [2] N. Ziu *et al*, “GNSS position integrity in urban environments: A review of literature,” *IEEE Trans. Intell. Trans. Syst.*, vol. 19, no. 9, pp. 2762–2778, Sep. 2018.
- [3] H. Jing *et al*, “Integrity monitoring of GNSS/INS based positioning systems for autonomous vehicles: State-of-the-art and open challenges,” *IEEE Trans. Intell. Trans. Syst.*, vol. 23, no. 9, pp. 14166–14187, Sep. 2022.
- [4] H. Pesonen, “A framework for Bayesian receiver autonomous integrity monitoring in urban navigation,” *Navigation*, vol. 58, no. 3, pp. 229–240, Mar. 2011.
- [5] L. Ding *et al*, “Bayesian integrity monitoring for cellular positioning—a simplified case study,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. Workshops*, Rome, Italy, 2022, pp. 1050–1056.