

측정치 시간 지연을 고려한 저속 회전 유도형 탄약의 롤각 추정

박준우*, 홍경우, 방효충

한국과학기술원

Roll Angle Estimation of Slowly Rolling Guided Munition with Time-delayed Measurement

Junwoo Park*, Kyungwoo Hong, Hyochuon Bang

Key Words : Time-delayed Measurement(시간 지연된 측정치), Slow Spin(저속 회전), Roll Estimation(롤 추정), Guided Munition(유도형 탄약)

서 론

유도형 탄약은 종래의 곡사 포탄이 지나는 운용적 한계를 극복하고자 탄에 활강의 개념을 도입한 무기체계이다. 목표물의 성격별로 변하는 타격 시나리오에 따라 탄약이 지나는 비행 프로파일이 다를 수 있으며, 여러 비행 조건에 대해서 강건한 항법 및 정밀 유도/제어 기법이 개발될 필요가 있다. 다만, 유도형 탄약은 기본적으로 포에서 고속으로 발사되기 때문에 회전 안정화를 유도하기 위해 발사 초기에는 롤축으로 매우 빠른 회전속도 가지며, 목표물 타격 전에는 정밀 유도 제어를 위해 0에 가깝거나 0인 롤축 회전 속도를 가지게 된다. 따라서, 모든 타격 시나리오에서 유도형 탄약은 회전 속도를 감쇄하고 저속 회전하는 이른바 천이 구간을 필연적으로 지나게 된다.

한편, 탄약 내부의 항전 장비들은 발사 초기 강한 물리적 충격에 대비해 전원이 인가되지 않은 채 발사된다. 발사 후 탄약의 속도 및 회전 속도가 특정 값 미만으로 감쇄하여 항전 장비들의 운용 범위 안에 들어왔을 때 IMU 및 GPS를 동작시킨다. 이때, 연달아서 구동될 관성 항법 장치 (Inertial Navigation System, INS)에서 사용할 초기값이 부재하는데, 특히 탄약의 자세 중에서 지속적인 회전을 통해 발사 당시의 값과 전혀 관계가 없는 롤각을 추정하여 INS에 넘겨주는 것이 중요하다.

본 연구팀은 선행연구⁽⁵⁾에서 저속 회전하는 유도형 탄약의 롤각을 추정하는 확장 칼만 필터(Extended Kalman Filter, EKF)를 설계한 바 있으며, 특히 박준우 등⁽¹⁾의 연구에서는 비행 실험을 통해서 저속 회전하는 유도형 탄약의 롤각 추정 성능을 검증하기도 했다. 탄약의 동체좌표계가 바람좌표계와 정렬되었다는 가정 아래, 다음과 같이 GPS기반 NED 속도로 피치 및 요각을 추정한다.

$$\hat{\theta} = \tan^{-1} \left(-\frac{v_d}{\sqrt{v_n^2 + v_e^2}} \right) \quad (1)$$

$$\hat{\psi} = \tan^{-1} \left(\frac{v_e}{v_n} \right) \quad (2)$$

단, GPS의 속도 해는 최대 10Hz 정도의 빠르기로 갱신되기 때문에 획득한 GPS 속도 값에 저역 통과 필터(Low Pass Filter)를 적용하여 탑재 컴퓨터로 활용되는 마이크로 컨트롤러(Micro Controller Unit, MCU)의 항법 갱신 주기에 맞게 스무딩(Smoothing) 및 노이즈 제거 효과를 얻는다. 이때, 일부 시간 지연이 발생한다. 이후, 연속한 시간 간격의 피치/요 측정치 식 (1), (2)의 차분을 통해 수치적 미분 값인 $\dot{\hat{\theta}}, \dot{\hat{\psi}}$ 을 얻는다. 높은 주기로 획득된 값을 차분하여 수치 미분하면 작은 변화에도 민감하고, 높은 주파수의 노이즈가 끼이는 것 같은 모습을 보이므로 해당 값을 다시 LPF에 통과시켜 활용한다. 하지만 이는 하나 이상의 필터를 거친 값이므로 참값보다 시간 지연이 발생하거나 위상차가 존재하는 값이라고 생각할 수 있다.

선행연구들에서는 이를 사전에 고려할 수 있었으나, EKF 설계에 반영하지 않았다. 본 연구에서는 시간 지연을 고려해 선행 연구^(1,5)에 소개된 EKF를 변형하여 재설계하며, 측정치 시간 지연의 확률적 모델링 기법⁽²⁾ 및 OOSM(Out-of-sequence Measurement) 기법^(3,4)을 적용함으로써 측정치의 시간 지연 아래에서도 유도형 탄약의 효과적인 롤추정이 가능함을 보인다.

본 론

LPF를 통과해 발생하는 측정치 시간 지연은 MCU의 구동 주파수와 LPF 차단 주파수(Cutoff Frequency)를 통해 추측하거나, 반복 실험으로 그 수준을 예측할 수 있다. 단, 운용 환경이나 측정치에 포함된 주파수 성분에 따라서 지연이 발생한 정도가 변화할 수 있는데, 불확실한 시간 지연에 대해 확률적인 모델링을 적용한 연구⁽²⁾에서는 증강 상태 칼만 필터(Augmented State Kalman Filter, ASKF)를 이용하여 문제를 풀고자 했다. 시간 지연이 발생할 수 있는 최대 time-step 개수 n 을 사전에 정의하여 $n+1$ 개의 상태 변수를 증강한다. 그리고 time-step에 대한 확률밀도함수로 시간 지연의 정도를 모델링 하였다. 대표적인 확률밀도함수는 가우시안 분포, 감마 분포, 균일 분포 등이 있다. 전체적인 알고리즘은 Table 1의 Pseudocode를 따른다.

Table 1. Measurement delay modeled ASKF

Algorithm: ASKF with Modeled Time Delay**Require:** $n \in N, u_i, (i \in N, 0 \leq i \leq n)$ **Procedure** **Estimate**($\hat{x}_{k-1}, P_{k-1}, Q_{k-1}, z_k, R_k$)

1. $\hat{x}_k^-, P_k^- \leftarrow \text{Predict}(\hat{x}_{k-1}, P_{k-1}, Q_{k-1})$
2. **for** $i \leftarrow 0, n$ **do**
3. $\hat{x}_{k,i}, P_{k,i} \leftarrow \text{Update}(\hat{x}_k^-, P_k^-, z_k, R_k, i)$
4. **end for**
5. $\hat{x}_k \leftarrow \sum_i u_i \hat{x}_{k,i}$
 $P_k \leftarrow \sum_i u_i [P_{k,i} + \hat{x}_{k,i} \hat{x}_{k,i}^T] - \hat{x}_k \hat{x}_k^T$
6. **return** \hat{x}_k, P_k

여기서 u_i 는 i 번째 시간 지연에 대한 가중치이며 모델링에 사용한 확률밀도함수 p , 시간간격 dt , 확률 표현 P 를 이용해 아래와 같은 식으로 구할 수 있다.

$$u_i = P(i dt \leq t < (i+1) dt) \quad (3)$$

$$= \int_{i dt}^{(i+1) dt} p(t) dt$$

Update, Predict 함수는 칼만 필터의 보정 및 전파식과 같으나, 측정치 수식 $z_k = h(k, x_k) + w_k$ 을 i 단계만큼 지연이 발생한 아래 식과 같이 변경하여 사용하며, 볼드체는 증강 상태를 의미한다.

$$z_k = h(k-i, \hat{x}_{k-i}) + w_{k-i} \quad (4)$$

$$\equiv h(k, i, \hat{x}_k) + w_{k-i}$$

OOSM기법⁽³⁾은 현재 시각 이전의 측정치를 이용해 추정치를 올바르게 보정하는 방법을 다룬다. 현재 시각 t_k 에서 t_κ ($\kappa < k$)의 측정치가 들어왔을 때, 아래와 같은 방법을 이용해 추정치를 보정할 수 있다.

$$W(k, \kappa) = P_{xz}(k, \kappa | k) S(\kappa)^{-1} \quad (5)$$

$$\hat{x}(k | \kappa) = \hat{x}(k | k) + W(k, \kappa) [z(\kappa) - H(\kappa) \hat{x}(k | k)]$$

$$P(k | \kappa) = P(k | k) - P_{xz}(k, \kappa | k) S(\kappa)^{-1} P_{xz}(k, \kappa | k)^T$$

상기를 통해 k 번째 측정치가 갱신된 상태 $\hat{x}(k | k)$ 와 이전 시간 κ 의 지연된 측정치 $z(\kappa)$ 로 추론할 수 있는 상태를 $W(k, x)$ 만큼의 비율로 가중 평균 한 $\hat{x}(k | \kappa)$ 를 도출할 수 있다. 본 문제는 반면, 지속적인 측정치 지연이 발생하는 상황이므로 예측 식으로 도출한 $\hat{x}(k | k-1)$ 를 사용한다. 이후 식 (1), (2)의 후처리로 인한 지연된 측정치가 들어왔을 때, 지연 시간만큼 역으로 전파한 다음 식 (5)를 이용해 갱신한다.

Fig. 1의 그래프는 선행 연구⁽¹⁾에서 수행 했던 비행 실험 데이터에 시간 지연에 대한 확률 모델링 적용 결과와 OOSM 기법을 적용한 결과를 도시한 것이다. 확률 모델의 경우 감마 분포, 가우시안 분포, 균일 분포를 사용하였으며 다수의 사후 실험을 통해 시간 지연

의 대략적인 수준 t_d 을 알고 있다고 가정하였다. Table 2에 확률 모델의 파라미터를 기술하였다.

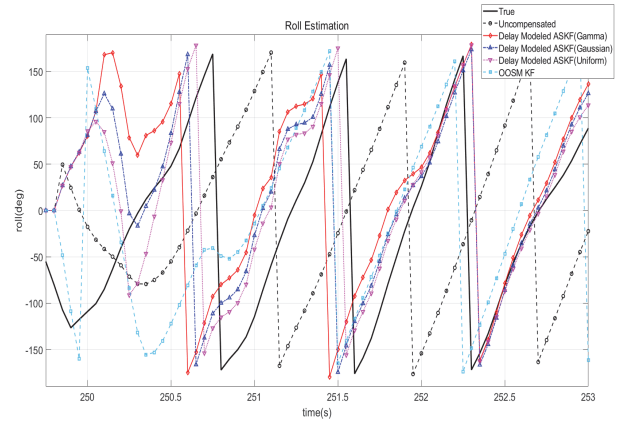


Fig. 1 Result of roll estimation with delayed measurement

Table 2. Parameters of delay models

Model	$\Gamma(x - t_d; k, \theta)$	$N(x; \mu, \sigma^2)$	$U(x; a, b)$
Param	$k = 1.2$ $\theta = 0.9$	$\mu = t_d$ $\sigma = 1.5$	$a = t_d - 3$ $b = t_d + 1$

결론

측정치 시간 지연을 확률 분포로 모델링하여 가중 평균을 도출하는 기법과 OOSM 기법을 적용한다면 후처리로 인해 시간 지연된 측정치로도 탄약의 효과적인 물각 추정이 가능한 것으로 보인다.

참고문헌

- 1) Park, J., Jung, W., Bang, H., Kim, J., Heo, J., Pak, C., Seo, S., "Verification of Roll Angle Estimation Performance of Slowly Rolling Guided Munition by Flight Experiment," *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 48, No. 9, 2020, pp. 681~689.
- 2) Choi, M., Choi, J., Chung, W. K., "State Estimation with Delayed Measurements Incorporating Time-delay Uncertainty," *IET Control Theory & Applications*, Vol. 6, No. 15, 2012, pp. 2351~2361.
- 3) Bar-Shalom, Y., "Update with Out-of-sequence Measurements in Tracking: Exact Solution," *IEEE Transactions on aerospace and electronic systems*, Vol. 38, No. 3, 2002, pp. 769~777.
- 4) Kim, Y., Hong, K., Bang, H., "Utilizing Out-of-sequence Measurement for Ambiguous Update in Particle Filtering," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic*

Systems, Vol. 54, No. 1, 2017, pp.493~501.

5) Lim, S. H., Pak, C. H., Cho, C. Y. and Bang, H. C., "Development of Flight Control System for Gliding Guided Artillery Munition – Part I: Operational Concept and Navigation," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 42, No. 3, 2014, pp. 221~228.