

## Geometry PIG를 위한 위치 결정 알고리즘

유재종, 한형석, 박찬국, 이장규  
 서울대학교, 경원대학교, 광운대학교, 서울대학교

### Position Determination Algorithm for Geometry PIG

Jae Jong Yu, Hyung Seok Han, Chan Gook Park, Jang Gyu Lee  
 Seoul Natl. Univ., Kyungwon Univ., Kwangwoon Univ., Seoul Nat. Univ.

**Abstract** - In this paper, the position determination problem for geometry PIG is considered. The PIG system is a device to examine the gas pipeline condition and detect the accurate position of dent or any undesirable state. In order to determine the position, the smoothing algorithm has been used and its performance analysis has been done by Monte Carlo simulation technique.

#### 1. 서 론

PIG 시스템은 배관 내부에 삽입되어 내부를 흐르는 매체에 의하여 추진되는 장치로서 배관을 운용하기 위한 거의 모든 단계에서 사용되고 있으며, 이에 따라 배관을 이용하는 석유, 가스 등의 수송에 필수적인 요소가 되었다. [1, 2]

최근에는 PIG의 성능을 개선하기 위하여 항법이나 제어 기술을 PIG 시스템에 적용하는 연구가 진행되고 있다. PIG 시스템에 항법시스템의 사용은 배관의 위치 정보를 매우 정확하게 알 수 있도록 하며, 센서등을 사용하여 검출된 손상부위의 위치를 보다 정확하게 알 수 있도록 한다. 또한, PIG를 운용하면서 얻어진 위치 데이터를 처음 배관을 건설할 시점과 비교하여 현재 배관이 어느 정도 벗어나 있는지 여부도 알 수 있을 것이다. 이처럼 PIG의 핵심요소라고 할 수 있는 항법시스템으로 관성항법시스템을 들 수 있다.

관성항법시스템(INS: Inertial Navigation System)은 관성공간에서 항체의 움직임을 감지하는 가속도계(accelerometer)와 자이로스코프(gyroscope)같은 관성 센서의 출력을 이용하여 외부의 도움 없이 항체의 위치, 속도 및 자세에 대한 정보를 제공하는 시스템이다. PIG는 배관내부에 삽입되기 때문에 소형, 저가, 저중량, 저전력 소비, 고신뢰성, 정비 및 설계 용이 등의 장점을 갖춘 SDINS가 적합하다.

보조센서 없이 IMU만을 사용하여 구성된 INS는 사용시간이 증가함에 따라 수평축 위치오차가 증가하고 고도오차도 기하급수적으로 증가하는 특성을 갖는다. 이러한 단점을 개선하기 위한 방법으로 위치 또는 속도 정보를 제공하는 비관성 보조센서의 도움을 받아 항법오차를 줄일 수 있는 보정항법(aided navigation)이 보편적으로 사용되고 있다. 이때 위치 정보를 제공하는 센서로는 GPS(Global Positioning System), Omega, Loran, Tacan, TERCOM, 고도계, 심도계 등이 있으며 속도 정보는 도플러 센서, 주행거리계(odometer) 그리고 자세 정보는 경사계(inclinometer), 자기 콤파스(magnetic compass) 등에 의해 제공된다.

본 연구에서 구성된 항법시스템은 부피가 작은 스트랩다운 방식으로 보정센서로는 주행거리계 및 위치 기준점(position reference point)등을 사용한다. 주행거리계는 PIG의 단위 시간 당 이동 거리의 측정치를 제공하

며 위치 기준점은 GPS 등을 이용하여 배관의 일정 거리마다 기준위치를 정확하게 측정하여 PIG에 제공하는 것이다. 이와 같이 구성된 복합항법시스템은 칼만필터를 이용한 보정항법 알고리즘을 통하여 매우 정확한 위치 측정이 가능하며 시간에 따라 PIG의 위치, 속도, 자세 오차 등의 항법 오차가 누적되는 것을 방지할 수 있다.

본 연구에서는 PIG의 운행 정보를 오프라인으로 전향(forward)과 후향(backward) 칼만필터를 구현함으로써 정확한 위치 정보를 계산하는데 목적이 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 PIG의 위치 결정 알고리즘에 대하여 설명한다. 그리고 3장에서는 시뮬레이션을 통해 위치 결정 시스템 성능을 분석하고 마지막으로 4장에서 결론을 맺는다.

## 2. PIG 위치 결정 알고리즘

### 2.1 PIG의 항법 알고리즘

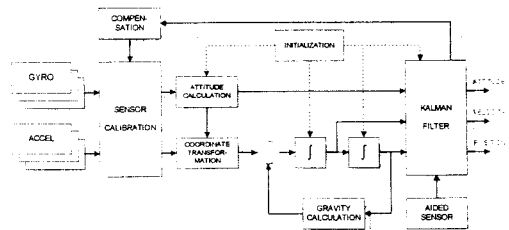


그림 1 항법알고리즘 흐름도

PIG 시스템의 항법 알고리즘은 그림 1과 같이 이루어진다. 그림 1에서 관성 센서인 자이로와 가속도계의 입력을 받아서 자세와 좌표변환의 정보를 계산하고 이를 이용하여 칼만필터에서는 보조센서의 정보 즉, 속도계와 GPS의 위치정보를 이용하여 보정된 자세, 속도, 위치 정보를 최종적으로 알아내게 된다. 이러한 항법알고리즘은 항체가 움직이는 동안에 실시간으로 구현될 수 있는 구조이며 이러한 전향필터를 사용한 경우이다. 이러한 항법알고리즘은 자세(롤, 피치, 요), 속도(3축), 위치(위도, 경도, 고도) 등의 상태변수로 구성되며 비선형 상태방정식으로 표현된다. [5]

위치, 속도, 자세 및 센서에 오차가 존재한다는 가정 하에 선형 섭동법을 적용하면 위치, 속도 및 자세 오차에 대한 항법오차 선형모델을 유도할 수 있다. 칼만필터에서는 이러한 선형모델에서 얻어지는 16차의 항법 오차모델을 사용한다. 이 오차모델의 상태변수로는 위치오차, 속도오차, 자세오차, 자이로/가속도계 바이어스, 속도계 환산계수(Scale factor)로 구성된다. 또한 필터의 측정치로는 동체 X-축 방향 속도(속도계 출력), 위치(land marking) 정보(GPS 출력)이다. 칼만필터는 상

태변수의 최적 추정치를 구하는 방법으로 구조가 선형적이며 실제값의 평균치  $E\{x\}$ 와 추정값의 평균치  $E\{\hat{x}\}$  사이에 바이어스가 없으며 추정된 상태변수  $x$ 의 오차 분산(error covariance)  $E\{(x-\hat{x})(x-\hat{x})^T\}$ 를 최소화 하는 특성을 가지고 있다. 이러한 칼만필터를 사용하기 위한 가장 어려운 작업은 주어진 시스템에 대한 모델링을 정확히 해야 하며, 그 모델은 선형이어야 한다는 것이다. 본 연구에서는 이산시간 칼만필터를 사용하였으므로 이에 대한 알고리즘을 설명한다. 다음과 같은 선형 시스템식과 측정식을 가정한다.[3]

$$x_{k+1} = F x_k + G w_k \quad (1)$$

$$z_{k+1} = H x_{k+1} + v_{k+1} \quad (2)$$

식(1)은 이산 선형 시스템의 시스템식이고, 식(2)는 측정식이다. 여기서  $x_k$ 는 상태변수를,  $w_k$ 과  $v_k$ 는 시스템 잡음과 측정치 잡음을 각각 나타낸다. 이때 이들 잡음의 특성은 다음과 같은 관계식을 만족하는 가우시안(Gaussian) 백색잡음이다.

$$\begin{aligned} E\{w_k\} &= E\{v_k\} = 0 \\ E\{w_k w_j^T\} &= Q_k \delta_{kj} \\ E\{v_k v_j^T\} &= R_k \delta_{kj} \\ E\{w_k v_j^T\} &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

칼만필터는 측정치  $\{z_1, z_2, \dots, z_k\}$ 가 주어지면 이를 이용하여 바이어스가 없고 상태변수  $x_k$ 와 추정치  $\hat{x}_k$ 와의 오차 분산  $E\{(x-\hat{x})(x-\hat{x})^T\}$ 를 최소화 하는 알고리즘으로 시간의 증가에 따른 계산(time propagation)과 측정치가 있을 때의 계산(measurement update)으로 나눌 수 있다. 먼저, k번째 시퀀스(sequence)에서 시간의 증가에 따른 계산 과정은 다음과 같다.

$$\hat{x}_k(-) = F_{k-1} \hat{x}_{k-1}(+) \quad (4)$$

$$P_k(-) = F_{k-1} P_{k-1} F_{k-1}^T + G Q_{k-1} G^T \quad (5)$$

여기서,  $\hat{x}_k(-)$ 는 k번째 측정치가 고려되지 않았을 때의 예측값이며,  $\hat{x}_{k-1}(+)$ 는 k-1번째 측정치가 고려되었을 때의 개선된 추정값을 나타낸다. k번째 측정치에 의한 상태변수의 갱신(update)은 다음과 같은 과정으로 한다.

$$K_k = P_k(-) H_k^T [H_k P_k(-) H_k^T + R_k]^{-1} \quad (6)$$

$$P_k = [I - K_k H_k] P_k(-) \quad (7)$$

$$\hat{x}_k(+) = \hat{x}_k(-) + K_k [z_k - H_k \hat{x}_k(-)] \quad (8)$$

$K_k$ 는 칼만이득(Kalman gain)값을 표시하고,  $P_k$ 는 공분산행렬을 나타낸다. 추정치와 공분산행렬의 초기치는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} E\{x(0)\} &= \hat{x}_0 \\ E\{(x(0) - \hat{x}_0)(x(0) - \hat{x}_0)^T\} &= P_0 \end{aligned} \quad (9)$$

## 2.2 PIG의 위치 결정 알고리즘

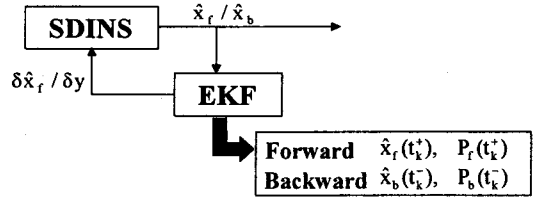


그림 2. 기본적인 위치 결정 알고리즘

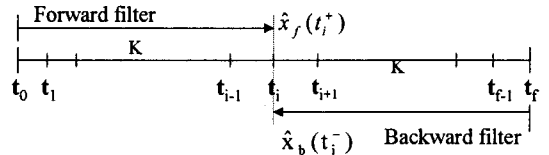


그림 3. 스무더의 기본 개념

전체적인 위치 결정 알고리즘은 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 앞절에서와 같이 필터에서 계산된 오차들은 전향필터로 출발시간에서 도착시간까지 시간에 대하여 순방향으로 항법 정보를 계산할 수 있고 또한 시간의 역방향으로 즉, 도착시간에서 출발시간까지의 항법정보를 후향필터로 계산할 수 있다. PIG 시스템의 특성상 오프라인으로 위치결정을 하게 됨으로 시간에 대하여 전향으로 계산된 항법과 측정치를 시간의 역방향으로 이용하여 계산된 후향 결과를 혼합할 수 있다. 이는 기본적인 스무더(Smoother)의 개념이다. 이를 시간축에 대한 그림으로 보면 그림 3과 같다. 즉 현재의 위치 및 항법 결과는 전향필터로 계산된 결과  $\hat{x}(t_i^+)$ 와 후향필터로 계산된 결과  $\hat{x}_b(t_i^-)$ 를 혼합한 결과로 계산된다. 이러한 최종결과  $\hat{x}(t_i/t_N)$ 는 다음의 관계식으로 계산된다.[4]

$$\hat{x}(t_i/t_N) = P(t_i/t_N) (P_f^{-1}(t_i^+) \hat{x}(t_i^+) + P_b^{-1}(t_i^-) \hat{x}_b(t_i^-))$$

$$P^{-1}(t_i/t_N) = P_f^{-1}(t_i^+) + P_b^{-1}(t_i^-) \quad (10)$$

식에서  $P_f, P_b$ 는 전향 및 후향필터에서 계산된 동분산행렬을  $t_i^+, t_i^-$ 는  $t_i$ 에서의 측정치로 갱신(update)한 것과 갱신하기 전의 값을 나타낸다.

## 3. 시뮬레이션 및 결과

앞 장에서 살펴본 PIG의 위치 결정 알고리즘의 성능 분석을 위하여 표 1와 같은 센서 사양을 사용하였다. 또한 시뮬레이션에 사용된 PIG 운행 궤적은 속도는 4m/sec로 위도 37deg, 경도 127deg, 고도 0m 지점에서 출발하여 그림 4와 같은 궤적으로 약 4000초 정도를 운행하는 경우를 고려하였다. 이러한 운행궤적에 대하여 속도계의 정보가 1초 마다 측정되며 위치정보를 주는 GPS신호는 매 2Km 주행시 마다 측정된다고 가정하였다.

이러한 상황에서 몬테칼로 시뮬레이션을 10회 수행하였을때의 결과를 살펴보면 그림 5와 같다. 그림 5에서 전향필터의 항법알고리즘을 이용한 결과와 후향 필터의

결과 그리고 이 둘을 혼합한 스무더의 결과를 비교하였다. 전향필터는 위치에 대한 GPS정보를 2회 이상을 이용하게 되면 CEP의 값이 줄어 들게 되며 반대로 후향필터인 경우에는 최종시간으로부터 처음 시간으로 진행되면서 정확하게 위치를 추정해 나감을 알 수 있다. 이를 더욱 정확하게 살펴보기 위하여 처음 부분과 최종 시간 부분을 확대하면 그림 6과 같다. 그림 6에서 전향과 후향필터의 결과를 혼합한 스무더의 결과는 이 두 개의 필터의 중간 정도의 성능을 보이며 일관된 성능을 보여 준다.

가속도계	바이어스 오차	1mg
	백색잡음	50mg
자이로	바이어스 오차	1deg/h
	백색잡음	0.35deg/h
GPS(위치오차)		0.2m
Odometer(속도오차)	환산계수	0.1%
	백색잡음	20mm/sec
초기자세오차 ( $\phi, \theta, \psi$ )	롤/피치	1deg
	요	2deg

표 1. 시뮬레이션에 사용된 변수

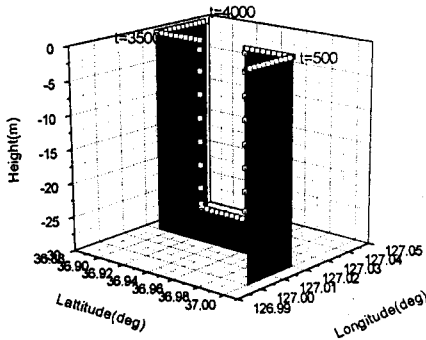


그림 4. PIG의 운항 궤적

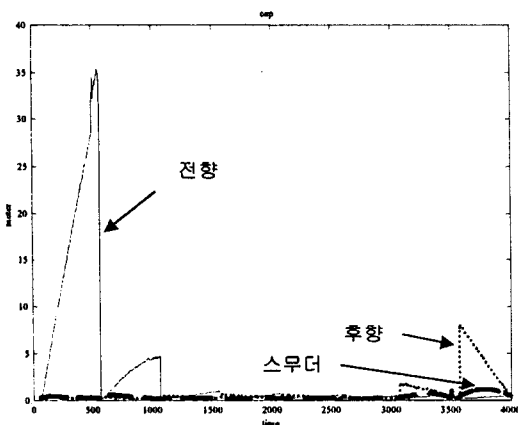
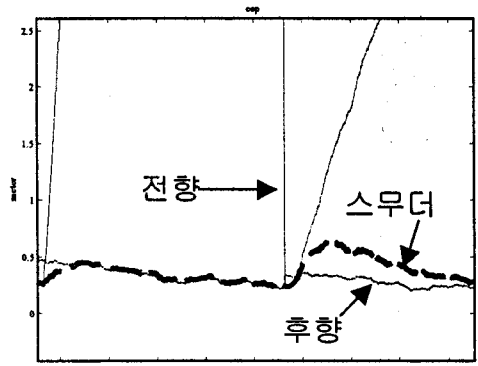
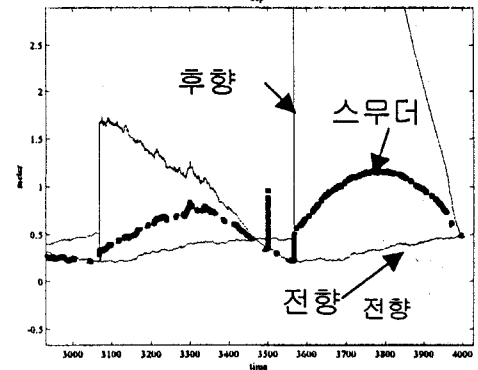


그림 5. PIG의 운항 궤적



(a) 초기 부분



(b) 말기 부분

그림 6. 초기 및 말기 부분의 위치 추정 성능

#### 4. 결론

본 논문에서는 배관의 이상을 감지하는 PIG시스템의 위치 결정 방법을 항법오차에 대한 16차 선형모델을 기준으로 칼만필터를 이용하여 전향과 후향필터를 구성하고 이의 결과들을 스무딩하는 방법으로 적용하여 결과를 분석하였다. 시뮬레이션 결과 후향과 전향 필터가 안정되기 이전의 구간, 즉 초기와 말기 구간에 대하여 위치 오차가 타 구간에 비하여 크게 발생함을 알 수 있었고 중간 구간에서는 양호한 결과를 보임을 알 수 있었다. 전구간에 걸쳐 양호하고 균일한 성능을 보이게 하기 위해서는 필터에서 사용한 확장칼만필터(Extended Kalman Filter)의 개념을 보완하여 선형화 칼만필터를 후향필터에 도입하는 방법을 연구할 필요가 있다.

#### (참고 문헌)

- [1] Jim Cordell, Hershel Vanzant, All About Pigging, On-Stream Systems Ltd, 1995
- [2] J.B. Nestleroth, T.A. Bubenik, GRI Pipeline Simulation Facility Magnetic Leakage Test Bed Vehicle, Gas Research Institute, 1996
- [3] Gelb, Applied Optimal Estimation, The MIT Press, 1974
- [4] Peter S. Maybeck, Stochastic Models, Estimation, and Control, Volume 2, Academic Press, 1982.
- [5] 박영범, INS/GPS/속도계 결합 항법시스템의 구성 및 성능분석, 서울대학교 대학원 석사논문, 2001