

## 이동거리정보를 이용한 Geometry PIG 보조 항법 알고리즘

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

### Geometry PIG aided navigation algorithm using distance information

Jaewon Seo, Jae Jong Yu, Jang Gyu Lee, Chan Gook Park, Hyung Seok Han  
 Seoul National Univ., Seoul National Univ., Seoul National Univ., Kwangwoon Univ., Kyungw-

**Abstract** - Geometry PIG 시스템은 배관의 상태 및 이상유무를 검사하여 그 결과를 저장하는 시스템으로 항법장치를 내장하고 있어 배관의 위치를 추정할 수 있다. PIG의 위치결정을 위해 후처리 보조 항법 알고리즘으로 비선형 스무딩 필터를 적용하고, 필터 측정치로 GPS를 이용한 위치기준점의 위치정보와 속도계를 이용한 속도 정보를 사용하고, 특히 본 논문에서는 이들 정보 외에 Weld detector를 이용한 직선이동거리정보를 이용한 후처리 보조 항법 알고리즘을 PIG 시스템에 적용한다.

#### 1. 서 론

PIG 시스템은 배관에 삽입되어 내부를 흐르는 매체에 의하여 구동되는 장치로 처음에는 매체의 흐름을 방해하는 퇴적물 등을 제거하기 위하여 개발되었으나, 오늘날에는 배관의 건설, 유지/보수, 그리고 해체 등의 배관 운용 전반에 사용되고 있으며, 이에 따라 배관을 이용하는 석유, 가스 등의 수송에 필수적인 요소가 되었다. PIG는 그 사용용도에 따라 Utility PIG와 Inspection PIG로 분류되며, Utility PIG는 배관의 유지 및 운용에 주로 사용되고, Inspection PIG는 배관의 상태나 손상 등을 조사하기 위하여 사용된다. 특히 본 논문에서 다루는 Geometry PIG는 Inspection PIG의 한 종류로 배관 내부의 물리적 손상형태와 그 위치 파악을 주요 목적으로 한다.

Geometry PIG 시스템의 배관 위치 파악의 필요성에 따라 PIG 시스템에 항법시스템을 적용하는데, 이는 배관의 위치정보를 매우 정확하게 제공하고, 검출된 손상 부위의 위치도 정확하게 알 수 있도록 한다. 이러한 PIG 시스템의 핵심요소인 항법시스템으로 최근에는 관성항법시스템을 주로 사용하는데, 관성항법시스템은 외부의 도움 없이 자체적으로 항법해를 구할 수 있는 시스템이며 지하에 묻혀 있는 배관의 내부를 진행하면서 데이터를 수집하는 PIG 시스템의 위치 파악에 매우 적합하다. 또한, PIG 시스템의 특성상, 관성항법시스템 중에 소형, 저가, 저전력소비의 장점을 갖는 스트랩다운 관성항법시스템(StrapDown INS;SDINS)이 주로 사용되며, 최근에는 PIG 시스템을 위한 스트랩다운 관성항법시스템으로 중급정도의 관성측정장치(Inertial Measurement Unit)를 탑재하고, 비관성 보조 센서를 사용하여 위치 추정치의 정확도를 향상시키는 보조 항법 시스템이 적용되고 있다.

본 논문에서는 PIG의 항법시스템으로 SDINS를 사용하고 보조 센서로 위치정보와 속도정보, 그리고 직선이동거리정보를 제공할 수 있는 위치기준점, 속도계 그리고 Weld detector를 이용하여 보조항법시스템을 구성한다. 위치기준점은 GPS를 이용하여 정확하게 측정된 지점을 PIG가 지나가는 순간 그 지점의 위치정보를 제공하는 형태로 이용되며, 주행거리계는 일정단위시간당 이동거리를 측정하여 속도정보를 제공하며, weld detector는 배관의 용접부위를 검출하여 이동거리를 제공하는 센서이다. 이들 센서가 제공하는 정보를 이용하

여 보조항법 알고리즘을 구성하고 항법해를 추정한다. 항법해의 추정을 위해 전항필터로는 확장칼만필터를 사용하고 후항필터로는 선형화칼만필터를 사용하는 비선형 스무딩 필터를 적용한다. 또한 후항 필터인 선형화칼만 필터는 항법해의 오차를 추정하는 형태로 구성하여 스무딩 알고리즘의 계산을 간단히 하여준다. [1]

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 PIG의 항법 알고리즘에 대해 설명하며 3장에서는 이를 위한 비선형 스무딩 필터에 대해 설명하며 4장에서는 직선이동거리 정보를 필터링에 사용하기 위한 방법에 대해 설명한다. 5장에서는 실험과 결과를 언급하고 6장에서 결론을 맺는다.

#### 2. PIG 항법 알고리즘

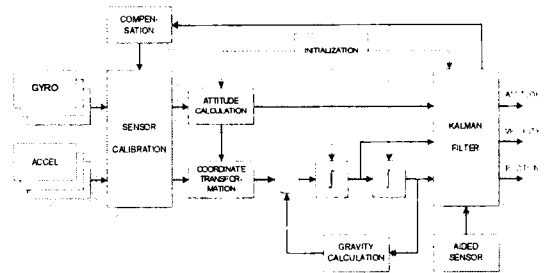


그림 1 PIG의 간접 되먹임 항법 알고리즘

일반적인 항법 알고리즘은 잘 알려져 있으므로 [5], 본 논문에서는 PIG에 적용되는 항법 알고리즘에 대해 간략히 설명한다. PIG의 항법 알고리즘은 그림 1과 같은 구조로 구성된다. 자이로와 가속도계로부터 얻어진 정보를 이용하여 자세와 좌표변환행렬을 계산하고 이를 이용하여 항법좌표에서의 속도 및 위치를 계산하게 된다. 이때 자이로와 가속도계로부터 얻어진 정보는 오차를 포함하고 있으므로 시간이 지남에 따라 오차가 누적되게 된다. 이 오차의 누적을 막기 위하여 칼만 필터와 같은 최적의 추정자를 이용하여 오차를 추정하고 이를 INS에 되먹임하여 오차를 보정하여 사용하게 된다. 이런 방식은 실시간 항법 시스템에 적용 가능한 방식이고 PIG와 같은 오프라인 후처리가 가능한 시스템은 스무딩 필터를 이용하여 항법오차를 보정하고 항법해를 추정할 수 있는 장점이 있다. 스무딩 필터는 항법해를 계산하고자 하는 시점 이후의 측정치를 이용하여 항법오차를 추정할 수 있고, 이용할 수 있는 정보가 많으므로 당연히 스무딩의 결과는 필터링의 결과보다 좋아지게 된다. 스무딩은 이용하는 정보의 시간 분포에 따라 고정구간 스무딩(Fixed interval smoothing)과 고정점 스무딩(Fixed point smoothing), 고정 지연 스무딩(Fixed lag smoothing)으로 분류될 수 있으며 PIG 항법시스템은

일정량의 데이터를 이용할 수 있으므로 고정구간 스무딩 필터를 사용한다.

### 3. 비선형 스무딩 알고리즘

항법해의 추정을 위해 사용되는 고정구간 스무딩 필터는 전향필터와 후향필터로 구성된다. 항법시스템은 비선형 시스템이므로 이들 필터는 비선형시스템에 적용할 수 있는 필터링 기법을 사용하여야 한다. 본 논문에서는 전향 필터로 확장칼만필터를 사용하고 후향필터로는, 스무딩 필터를 구성할 때 계산을 간단히 하여주는 장점을 갖는 선형화칼만필터를 사용하였다.

#### 3.1 확장칼만필터(Extended Kalman filter)

확장칼만필터는 비선형시스템의 상태변수 추정에 많이 사용되는 필터이다. 비선형 항법시스템을 공칭점을 기준으로 선형섭동법을 이용하여 항법오차에 대해 선형화하고 칼만 필터를 적용하는 방식으로 구성된다. 이 때 공칭점은 이전의 확장칼만필터의 추정치를 이용하여 구성한다. 비선형시스템은 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{\hat{x}}(t) = f[x(t), t] + G(t)u(t) \quad (1)$$

$$z(t) = h[x(t), t] + v(t) \quad (2)$$

(1)과 (2)로 나타내어지는 시스템에 대한 확장칼만필터의 시간전파식과 측정치 갱신식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{\hat{x}}(t | t_k) &= f[x(t | t_k), t], \hat{\hat{x}}(t_k | t_k) = \hat{x}(t_k^+) \\ P(t | t_k) &= F[t; \hat{\hat{x}}(t | t_k)]P(t) \\ &\quad + P(t)F^T[t; \hat{\hat{x}}(t | t_k)] + G(t)Q(t)G^T(t) \\ P(t_k | t_k) &= P(t_k^+) \\ \hat{x}(t_k^+) &= \hat{x}(t_k^-) + K_k [z(t_k) - h[\hat{x}(t_k^-), t_k]] \\ K_k &= P(t_k^-)H^T[t_k; \hat{x}(t_k^-)] \{ H[t_k; \hat{x}(t_k^-)]P(t_k^-)H^T[t_k; \hat{x}(t_k^-)] \\ &\quad + R(t_k) \}^{-1} \\ P(t_k^+) &= [I - K_k H[t_k; \hat{x}(t_k^-)]] P(t_k^-) [I - K_k H[t_k; \hat{x}(t_k^-)]]^T \\ &\quad + K_k R(t_k) K_k^T \end{aligned}$$

여기서,

$$\begin{aligned} F[t; \hat{\hat{x}}(t | t_k)] &= \left. \frac{\partial f[x(t), t]}{\partial x} \right|_{x = \hat{\hat{x}}(t | t_k)}, \quad \forall t \in [t_k, t_{k+1}) \\ H[t_k; \hat{\hat{x}}(t_k^-)] &= \left. \frac{\partial h[x(t_k), t_k]}{\partial x} \right|_{x = \hat{\hat{x}}(t_k^-)} \end{aligned}$$

이다.

#### 3.2 선형화칼만필터(Linearized Kalman filter)

확장칼만필터는 공칭점을 계산하기 위해 추정치를 이용하지만 선형화 칼만필터는 비선형시스템의 선형화할 공칭점이 미리 주어지는 경우에 적용할 수 있는 기법이다. (1)과 (2)로 나타내어지는 비선형시스템에 대한 선형화칼만필터의 시간전파식과 측정치 갱신식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{\hat{x}}(t) &= f[x_n(t), t] + F[t; x_n(t)] \{ \hat{x}(t) - x_n(t) \} \\ \dot{P}(t) &= F[t; x_n(t)]P(t) + P(t)F^T[t; x_n(t)] + G(t)Q(t)G^T(t) \\ \hat{x}(t_k^+) &= \hat{x}(t_k^-) + K_k [z(t_k) - h[x_n(t_k), t_k] \\ &\quad - H[t_k; x_n(t_k)] \{ \hat{x}(t_k^-) - x_n(t_k) \}] \\ K_k &= P(t_k^-)H^T[t_k; x_n(t_k)] \{ H[t_k; x_n(t_k)]P(t_k^-)H^T[t_k; x_n(t_k)] \\ &\quad + R(t_k) \}^{-1} \end{aligned}$$

$$P(t_k^+) = [I - K_k H[t_k; x_n(t_k)]] P(t_k^-) [I - K_k H[t_k; x_n(t_k)]]^T + K_k R(t_k) K_k^T$$

여기서,

$$\begin{aligned} F[t; x_n(t)] &= \left. \frac{\partial f[x(t), t]}{\partial x} \right|_{x = x_n(t)} \\ H[t_k; x_n(t_k)] &= \left. \frac{\partial h[x(t_k), t_k]}{\partial x} \right|_{x = x_n(t_k)} \end{aligned}$$

이고,  $x_n(t)$ 는  $t$ 시간에서의 미리 주어진 공칭점이다.

#### 3.3 스무딩 필터

3.1과 3.2에서 언급한 전향필터(확장칼만필터)와 후향필터(선형화칼만필터)를 이용하여 비선형 스무딩 필터를 구성한다. 후향필터는 전향필터와의 상관관계가 없어야 하므로 다음의 식 (3),(4)와 같은 새로운 변수를 설정하고  $P_b^{-1}(t_f) = 0$ 으로 한다. 이렇게 하는 이유는 후향필터의 초기정보가 없는 것으로 하여 전향필터와 독립적으로 추정치를 계산하게 하기 위한 것이다.

$$\hat{y}_b(t_k^-) = P_b^{-1}(t_k^-) \hat{x}_b(t_f^-) \quad (3)$$

$$\hat{y}_b(t_k^+) = P_b^{-1}(t_k^+) \hat{x}_b(t_f^+) \quad (4)$$

새로운 변수를 이용하여 항법해의 오차에 대한 후향필터를 구성하면 다음과 같다.[1]

$$\begin{aligned} \delta \hat{y}_b(0) &= 0, \quad P_b^{-1}(0) = 0 \\ \delta \hat{y}_b(\tau) &= \{ \bar{F}^T(\tau) - P_b^{-1}(\tau) \bar{Q}(\tau) \} \delta \hat{y}_b(\tau) \\ P_b^{-1}(\tau) &= P_b^{-1}(\tau) \bar{F}(\tau) + \bar{F}^T(\tau) P_b^{-1}(\tau) \\ &\quad - P_b^{-1}(\tau) \bar{Q}(\tau) P_b^{-1}(\tau) \\ \delta \hat{y}_b(\tau_k^+) &= P_b^{-1}(\tau_k^-) \delta \hat{x}_f(\tau_f - \tau_k^+) + \delta \hat{y}_b(\tau_k^-) \\ &\quad - H(\tau_k) R^{-1}(\tau_k) \delta z(\tau_k) \\ P_b^{-1}(\tau_k^+) &= P_b^{-1}(\tau_k^-) + H^T(\tau_k) R^{-1}(\tau_k) H(\tau_k) \end{aligned}$$

이들 양방향 필터의 결과를 이용하여 스무딩 필터를 구성하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{x}_s(t_k) &= P_s(t_k) [P_f^{-1}(t_k^+) \hat{x}_f(t_k^+) + \hat{y}_b(t_k^-)] \\ &= P_s(t_k) [P_f^{-1}(t_k^+) \hat{x}_f(t_k^+) + P_b^{-1}(t_k^-) \hat{x}_b(t_k^-)] \\ &= \hat{x}_f(t_k^+) - P_s(t_k) \delta \hat{y}_b(t_k^-) \end{aligned}$$

여기서,

$$P_s^{-1}(t_k) = P_f^{-1}(t_k^+) + P_b^{-1}(t_k^-)$$

이고,  $\hat{x}_f(t_k^+)$ 은 전향필터의 갱신 후 상태변수이고,  $\delta \hat{y}_b(t_k^-)$ 는 후향필터의 갱신 전 상태변수의 오차값이다.

### 4. FIG 항법시스템에의 적용

3장에서 언급한 비선형 스무딩 알고리즘을 FIG 항법시스템에 적용한다.

#### 4.1 상태방정식 구성

3장에서 언급한 비선형 스무딩 필터를 FIG에 적용하기 위하여 비선형 항법 시스템을 상태방정식으로 구성한다. 상태변수는 위치(3), 속도(3), 자세(3)로 구성되며 선

형 섭동법을 이용한 선형 항법오차모델은 위치오차(3), 속도오차(3), 자세오차(3), 자이로 바이어스(3), 가속도계 바이어스(3), 주행거리계 환산계수(1)로 총 16차 모델로 얻어진다.[5]

#### 4.2 측정방정식 구성

위치기준점이나 주행거리계를 이용한 측정방정식은 일반적으로 많이 사용되고 있고 잘 알려져 있으므로 직선 이동거리정보를 이용한 측정방정식만을 유도한다.

직선이동거리정보는 weld detector를 이용하여 얻을 수 있다. 용접부위가 일정한 거리마다 존재할 경우 용접 부위를 검출하는 weld detector를 이용하면 PIG의 이동거리정보를 얻을 수 있다. 이때 두 용접부위간을 PIG가 이동하는 동안 물자를 제외한 자세각의 변화가 없다면 직선구간을 이동했음을 알 수 있다. 그런 경우 두 지점간을 직선으로 움직인 것이고 일정한 간격으로 용접부위가 존재해 있으므로 식 (5)와 같은 측정방정식을 유도할 수 있다.

$$\delta l_k \approx H_k \delta x_k + v_k \quad (5)$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{\hat{y}_k - \hat{y}_{k-1}}{D_k} (R+h) \\ \frac{\hat{x}_k - \hat{x}_{k-1}}{D_k} (R+h) \cos L \\ \frac{\hat{z}_k - \hat{z}_{k-1}}{D_k} \\ 0_{13 \times 1} \end{bmatrix}^T \delta x_{16 \times 1} + v_k$$

$$\delta l_{16 \times 1}^T = [\delta L \quad \delta l \quad \delta h \quad \Delta_{13 \times 1}] \quad (6)$$

여기서,  $\hat{x}_k, \hat{y}_k, \hat{z}_k$ 는 k번째 이동거리정보가 주어지는 순간의 항법좌표계에서의 위치 추정치이고  $D_k$ 는 k번째 직선이동거리추정치이고,  $R$ 는 지구반경,  $h$ 는 고도,  $L$ 은 위도,  $v_k$ 는 측정오차이고, 상태변수는 식(5)와 같이 구성된다. 여기서  $\delta L$ 은 위도오차,  $\delta l$ 은 경도오차,  $\delta h$ 는 고도오차,  $\Delta_{13 \times 1}$ 은 나머지 오차성분들이다. 자세변화의 유무는 INS가 항법해를 계산하므로 두 지점간을 이동하는 동안 자세각의 변화를 검사함으로써 알 수 있다. 이 측정방정식은 근사식으로 어느 정도의 모델링 오차를 가지고 있으므로 이를 보상하기 위해 측정치의 측정오차를 약간 크게 하여 알고리즘을 수행한다.

#### 4.3 스무딩 알고리즘에서의 직선이동거리정보 이용

스무딩은 측정치가 있는 순간에만 적용하여 추정을 하기 때문에 속도측정치나 위치측정치처럼 어떤 순간에 대한 측정치가 주어지는 경우에는 잘 적용할 수 있다. 그러나, 직선이동거리정보는 그림 2와 같이 두 지점사이를 주행한 후에, 즉 일정시간에 걸쳐서 측정치가 얻어지고, 같은 직선이동거리정보에 대해 전향필터는  $t_f$  시간에서, 후향필터는  $t_b$  시간에서 각각 측정치를 이용하므로, 본 논문에서와 같이 후향필터가 전향필터의 항법 오차를 추정하는 방식으로 구성되면, 두 필터의 결과를 스무딩할 수가 없는 경우가 일반적으로 많다. 따라서 속도측정치나 위치측정치처럼 이동거리정보가 얻어진 순간에 스무

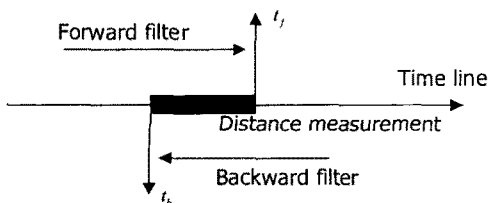


그림 2 직선이동거리정보

딩을 하기는 어렵다. 그러나 PIG 시스템처럼 속도정보가 짧은 간격으로 얻어진다면 스무딩을 하는 주기가 짧으므로 직선이동거리정보는 전향필터나 후향필터 각각에 측정치로 사용하되 스무딩은 속도정보나 위치정보가 얻어진 순간에만 적용하여도 무리가 없다.

## 5. 실험 및 결과

앞절에서 언급한 항법 알고리즘을 실험판 실험을 하여 얻은 데이터에 적용하여 배관의 위치를 계산해 보았다.

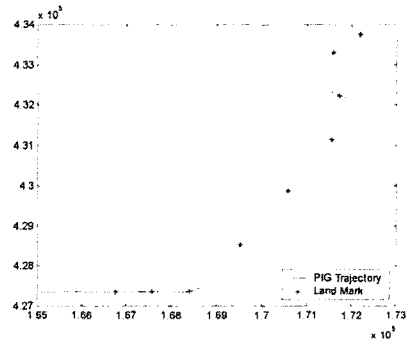


그림 3 보조항법알고리즘 수행 결과

총 주행거리는 약 12.6km이고 항법좌표계의 XY평면상의 항법 결과는 그림 3의 결과와 같다. 그림의 x축과 y축의 단위는 미터이다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 PIG에 적용하기 위한 항법 알고리즘으로 위치정보와 속도정보, 그리고 직선이동거리정보를 측정치로 이용하는 비선형 스무딩 항법 알고리즘을 구성하였다. 비선형 스무딩 필터는 전향필터로 확장칼만필터를 사용하였고 후향필터로 선형화칼만필터를 사용하였으며 이들 필터를 이용하여 항법해를 추정하는 보조 항법 알고리즘을 구성하였다. 구성된 알고리즘을 실제 실험 데이터에 적용하여 항법해를 구했으며 그 결과 제안된 알고리즘이 적용가능함을 확인하였다.

## 후 기

본 논문은 한국가스공사 연구개발원과 서울대학교 자동화시스템공동연구소, BK21 서울대-고려대 정보기술사업단의 지원에 의한 연구 결과입니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 유재중, 한형석, 박찬국, 이장규, 홍현수, "비선형 고정구간 스무딩 필터 설계 및 SDINS에 응용", International Conference on Control, Automation and Systems 논문집, 2001
- [2] 유재중, 한형석, 박찬국, 이장규, "Geometry PIG를 위한 위치 결정 알고리즘", 2001년 대한전기학회 하계학술대회 논문집
- [3] Gelb, "Applied Optimal Estimation", The MIT press, 1974
- [4] Cordell, Vanzant, "All about pigging", on stream systems Ltd, 1995
- [5] 박영범, "INS/GPS/속도계 결합 항법 시스템의 구성 및 성능 분석", 서울대학교 대학원 석사학위 논문, 2001