2002년도 대한전자공학회/대한전기학회 시스템 및 제어분야 합동 추계학술대회 논문집(2002.11.30)

PIG 시스템에 적용된 오프라인 항법시스템

유 재 종*, 한 형 석**, 박 찬 국***, 이 장 규*
* 서울대학교 전기공학부, ** 경원대학교 전자공학과, ***광운대학교 제어계측공학과
전화 : 031-750-5561 / 이메일 : hshan@kyungwon.ac.kr

Off-Line Navigation System for PIG(Pipeline Investigation Gauge)

Jae Jong Yu, Hyung Seok Han*, Chan Gook Park, Jang Gyu Lee
* Dept. of Electronic Eng., Kyungwon University
E-mail : hshan@kyungwon.ac.kr

Abstract

In this paper, PIG(Pipeline Investigation Gauge) system is introduced and off-line navigation method for the system is studied. Off-line navigation is obtained by using a smoothing filter and the position of the point with some problems in gas pipeline can be detected with a good accuracy in real pipeline investigation experiment..

I. 서론

PIG 항법 시스템은 PIG가 주행했던 가스배관의 위치를 정확하게 파악하기 위한 시스템으로 배관의 유지보수에 필수적인 요소라 할 수 있다. PIG 항법 시스템은 관성항법 시스템(INS: Inertial Navigation System)을 이용하며, 이외에도 외부로부터 수신되는 전파를 이용하여 위치를 측정하는 전파항법 시스템도 있으나 PIG는 가스배관 내부를 주행하므로 이러한 방식은 사용할 수 없다.

관성항법시스템은 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 시스템으로 스트랩다운 관성항법시스템(SDINS: StrapDown INS)는 1970년대 이후 응용분야가 점점 확대되는 추세에 있으며, PIG 항법시스템에서도 스트랩다운 관성항법시스템을 적용한다.

관성센서만을 이용하여 항법 해를 구하게 되면 항법 오차는 시간에 따라 증가하여 발산하게 된다. 이러한 단점을 개선하기 위한 방법으로 위치 또는 속도 정보를 제공하는 비관성 보조센서의 도움을 받아 항법오차를 줄일 수 있는 보조항법(aided navigation)이 있다. PIG 항법 시스템에서도 보조센서를 사용한 보조항법 방식을 사용하고 있으며, 본 연구에서는 PIG 보조센서로 주행거리계와 위치 기준점에서의 GPS 신호를 사용하였다.

PIG 항법 시스템은 실제 배관에 삽입하여 데이터를 얻게되며 PIG 항법 알고리듬은 가스배관을 주행하는 동안에 저장된 데이터로부터 가스배관의 위치 및 기타 항법 정보를 추정하는 알고리듬이다. PIG 시스템은 항법 알고리듬을 오프라인(off-line) 방식으로 수행하기 때문에 비선형 스무딩 기법을 적용하여 항법 정보를 추정하였다.

II. PIG 시스템 구성 및 항법시스템

2.1 PIG 시스템 구성

PIG를 크게 부분하면 유틸리티(Utility) 피그(혹은 conventional 피그)와 인텔리전트 피그(또는 in-line

inspection tools)로 나눌 수 있다. 유틸리티 피그는 배관내부의 세척, 수송 물질의 분리 , 수분제거등의 목적으로 사용되는 것이며, 인텔리전트 피그란 배관에 발생한 문제의 위치와 정도를 측정하여 배관의 상태에 관한 정보를 획득하기 위하여 운용되는 것이다. 인텔리전트 피깅에서는 원활한 본 피깅을 위하여 배관내부의 세척(크리닝 피깅), 본피그의 통과 여부를 진단하는 예비 피깅(캘리퍼 피깅, 지오메트리 피깅)을 실시한다.[1] 지오메트리 피그의 기능은 배관의 굴곡도와 각 배관의 굴곡도의 위치, 규격등의 배관내의 상황을 파악하기 위한 것이다,[1] 이러한 기능을 원할하게 수행하기 위하여 지오메트리 피그에는 다음과 같은 시스템이 장착되게 된다.[2-5]

- 배관의 위치 파악 시스템
  - 관성항법장치
  - 주행거리계
  - 보조 위치 정보 시스템
- 배관의 규격 측정 시스템
  - 배관 직경 측정 시스템
- 배관 환경 측정 시스템
  - 온도센서
  - 압력센서

다음의 그림은 개략적인 지오메트리 피그의 외형을 도시한 것이다.

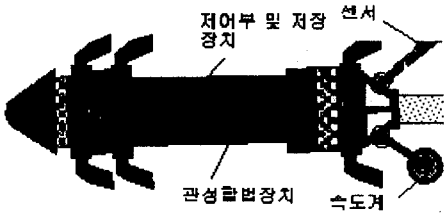

그림 1 지오메트리 PIG의 시스템 구성

그림에서 제어부는 전체 시스템의 운용을 제어하는 제어용 보드 및 센서 신호처리 보드가 포함되며 저장시스템은 센서의 정보 및 항법 정보등 모든 정보를 저장하는 장치이다. 또한 속도계(주행거리계)는 PIG의 운항 속도를 알아내는 부분이며 그 외의 센서는 파이프 내부 직경을 파악하기 위한 센서를 나타낸다. PIG의 뒷 부분에는 지상의 기준점을 지나가는 것을 파악하기 위한 트랜스미터가 장착된다.

2.1 PIG 시스템의 오프라인 항법시스템

PIG에 내장된 관성 센서이외에 외부의 기준점에 대한 정보를 위치 정보로 사용하게 된다. 이는 이미 알고 있는 기준점에 추적 모듈(tracking module)을 두고 이 지점을 PIG가 지나가게 되면 그 때의 시간을 기록하여서 위치 정보로 활용하게 된다. 추적 모듈은 PIG에 장착된 트랜스미터에서 발생되는 신호를 감지함으로써 PIG의 지나감을 인지하게 된다. 기준점의 위치는 GPS를 이용한 측량방법으로 정확하게 구하여 준비된다.

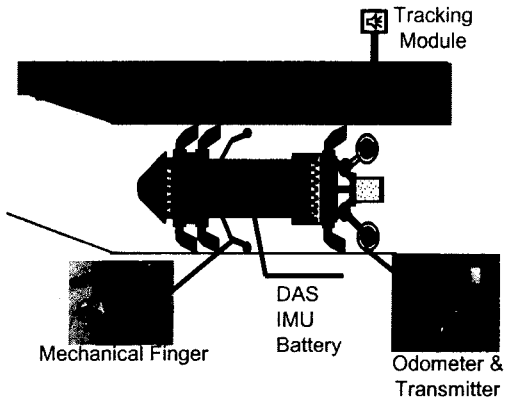

그림 2 PIG 시스템의 운영

위와 같은 보조 센서, 즉, 속도정보와 위치정보를 활용하여 자체의 IMU 정보와 이를 혼합하게 되며 이의 과정은 아래의 그림에 나타난다.

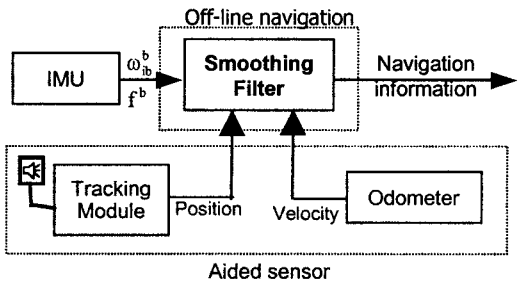

그림 3 오프라인 항법시스템 구성

오프라인 항법시스템은 스무딩 필터를 사용하게 되며 스무딩 필터의 구조는 정방향 필터(forward filter), 역방향 필터(backward filter), 그리고, 이들 추정 결과를 융합하는 부분으로 구성되는 이중필터(two-filter) 구조를 갖게 된다.[2] 이러한 이중필터 구조를 갖는 비선형 시스템에 대한 스무딩 필터는 정방향 필터로 확장 칼만필터(extended Kalman filter)를 사용하고, 역방향 필터로 정방향 필터의 추정 결과를 공칭점(nominal

point)으로 하여 비선형 시스템을 선형화하여 얻은 선형화 필터(linearized filter)를 사용한다.[6]

비선형 스무딩 필터는 다음과 같은 비선형 시스템 모델 및 측정치 모델에서 유도된다.

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

$$z(t_i) = h[x(t_i), t_i] + \nu(t_i) \quad (2)$$

여기서, 공정잡음(process noise) $w(t)$ 및 측정잡음 $\nu(t_i)$는 평균이 영(zero)인 가우시안 분포를 갖는 백색잡음으로 각각 $E\{w(t)w^T(t+\tau)\} = Q(t)\delta(\tau)$, $E\{\nu(t_i)\nu^T(t_j)\} = R(t_i)\delta_{ij}$를 만족하며, 공정잡음 $w(t)$와 측정잡음 $\nu(t_k)$는 상관관계가 없는 $E\{w(t)\nu^T(t_k)\} = 0 \ \forall \ t, t_k$를 만족한다고 가정한다.

정방향의 확장칼만필터 식은 다음과 같이 정리된다.

상태변수의 초기 조건은 $x(0) \sim N[\hat{x}_0, P_0]$와 같은 정규분포를 갖는다고 가정하면, 시스템의 상태변수 추정치 $\hat{x}(t)$ 및 공분산 행렬 $P(t)$에 대한 시간 전달(time propagation) 식은 다음과 같다.

$$\dot{\hat{x}}(t \mid t_k) = f[x(t \mid t_k), t], \hat{x}(t_k \mid t_k) = \hat{x}(t_k^+) \quad (3)$$

$$\dot{P}(t \mid t_k) = F[t; \hat{x}(t \mid t_k)]P(t) + P(t)F^T[t; \hat{x}(t \mid t_k)] + G(t)Q(t)G^T(t), \quad P(t_k \mid t_k) = P(t_k^+) \quad (4)$$

이때, 시간은 $t_{k-1}^+ \le t \le t_k^-$를 만족하며, 윗첨자 +는 측정치 갱신 직후를, -는 측정치 갱신 직전을 각각 나타낸다.

측정치가 있을 경우($t = t_k^+$)에 갱신(measurement update) 식은 다음과 같이 주어진다.

$$\hat{x}(t_k^+) = \hat{x}(t_k^-) + K_k\{z(t_k) - h[\hat{x}(t_k^-), t_k]\} \quad (5)$$

$$K_k = P(t_k^-)H^T[t_k; \hat{x}(t_k^-)]\{H[t_k; \hat{x}(t_k^-)]P(t_k^-)H^T[t_k; \hat{x}(t_k^-)] + R(t_k)\}^{-1} \quad (6)$$

$$P(t_k^+) = \{I - K_kH[t_k; \hat{x}(t_k^-)]\}P(t_k^-)\{I - K_kH[t_k; \hat{x}(t_k^-)]\}^T + K_kR(t_k)K_k^T \quad (7)$$

여기서,

$$F[t; \hat{x}(t \mid t_k)] = \left.\frac{\partial f[x(t), t]}{\partial x}\right|_{x = \hat{x}(t \mid t_k)}, \ \forall \ t \in [t_k, t_{k+1})$$

$$H[t_k; \hat{x}(t_k^-)] = \left.\frac{\partial h[x(t_k), t_k]}{\partial x}\right|_{x = \hat{x}(t_k^-)}$$ 를, K_k는 칼만필터 이득 행렬을 각각 나타내며,

$$\lambda_b(t_f^-) = P_b^{-1}(t_f^-)\hat{x}_b(t_f^-) = 0$$

$$\lambda_b(t_k^-) = P_b^{-1}(t_k^-)\hat{x}_b(t_k^-)$$

$$\lambda_b(t_k^+) = P_b^{-1}(t_k^+)\hat{x}_b(t_k^+) \quad (8)$$

$$\frac{d}{d\tau}P_b^{-1}(\tau) = P_b^{-1}(\tau)\overline{F}(\tau) + \overline{F}^T(\tau)P_b^{-1}(\tau) - P_b^{-1}(\tau)\overline{Q}(\tau)P_b^{-1}(\tau) \quad (9)$$

$$\frac{d}{d\tau}\lambda_b(\tau) = \{\overline{F}^T(\tau) - P_b^{-1}(\tau)\overline{Q}(\tau)\}\lambda_b(\tau) - P_b^{-1}(\tau)\{f[\hat{x}_f(t_f - \tau), t_f - \tau] - \overline{F}(\tau)\hat{x}_f(t_f - \tau)\} \quad (10)$$

여기서, $F[t; x_n(t)] = \left.\frac{\partial f[x(t), t]}{\partial x}\right|_{x = x_n(t)}$,

$$H[t_k; x_n(t_k)] = \left.\frac{\partial h[x(t_k), t_k]}{\partial x}\right|_{x = x_n(t_k)},$$

$\overline{F}(\tau) = F[t_f - \tau; \hat{x}_f(t_f - \tau)]$,

$\overline{Q}(\tau) = G(t_f - \tau)Q(t_f - \tau)G^T(t_f - \tau)$,

$\lambda_b(\tau) = P_b^{-1}(\tau)\hat{x}_b(\tau)$를 각각 나타내며, 초기 조건은 $\lambda_b(0) = 0$, $P_b^{-1}(0) = 0$와 같다.

측정치 갱신 식은 다음과 같이 유도된다.

$$\lambda_b(\tau_k^+) = \lambda_b(\tau_k^-) + H(\tau_k)R^{-1}(\tau_k)\{z(\tau_k) - h[\hat{x}_f(\tau_k^-)] + H(\tau_k)\hat{x}_f(\tau_k^-)\} \quad (11)$$

$$P_b^{-1}(\tau_k^+) = P_b^{-1}(\tau_k^-) + H^T(\tau_k)R^{-1}(\tau_k)H(\tau_k) \quad (12)$$

정방향 필터 결과인 $\hat{x}_f(t_k^+), P_f(t_k^+)$와 역방향 필터 결과인 $\lambda_b(t_k^-), P_b(t_k^-)$로부터 스무딩된 상태변수는 다음 식을 이용하여 계산한다.

$$\hat{x}_s(t_k) = P_s(t_k)[P_f^{-1}(t_k^+)\hat{x}_f(t_k^+) + \lambda_b(t_k^-)] \quad (13)$$

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

II. 실험 및 결과 고찰

실제 시험은 30인치 배관, 58Km 의 주행거리를 갖는 구간에서 수행되었다. PIG의 이동 속도는 약 2.9 m/s 정도로 파악된다. 필터의 모델로 항법 오차 모델(위치오차,속도오차,자세오차,가속도계 오차, 자이로 오차) 및 주행거리계의 환산계수 오차를 포함한 16차 모델을 사용하였으며, 측정치 모델은 속도 측정치 및 위치 기준점에 대한 오차 모델을 사용하였다. 사용 센서들에 대한 특성은 다음의 표 1에 정리되었다. 필터의 공정잡음은 가속도계는 $0.1m/s^2$으로, 자이로는 $17.5\deg/h$로 하였다.

실측한 데이터를 이용하여 그 결과를 표2와 그림 4에 나타내었다. 표2는 실측한 데이터를 이용하여 항법 결과인 궤적까지 가장 가까운 거리를 근사적으로 구한 결과이기 때문에 작은 오차는 존재할 수 있다. 또한, 실제 측량을 위한 배관의 위치를 찾는 과정에서도 오차는 존재할 수 있을 것으로 판단된다.

표 2에서, 점검점 1-5까지는 실측한 결과와 차이가 모두 1m 이내로 예상했던 것처럼 오차가 작았다.

표 1. 센서에 대한 표준편차(1σ)

자이로	바이어스	3deg/h
	잡음	17.5deg/h
가속도계	바이어스	1mg
	잡음	0.1m/s^2
위치 기준점	잡음	0.2m
속도 측정치	환산계수 오차	0.1%
	잡음	20mm/s

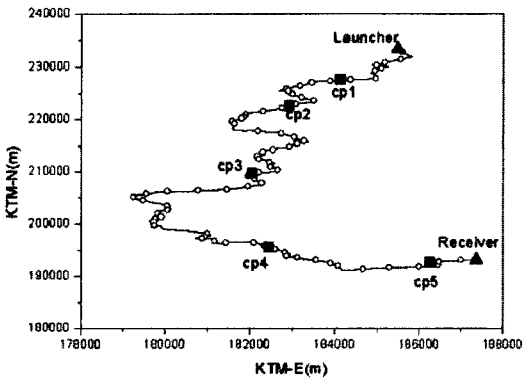

그림 4 PIG 시스템의 주행 궤적

표2. 항법 결과 비교

Check point	오차(m)
1	0.6
2	0.5
3	0.2
4	0.8
5	0.4

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 가스 배관을 검사하는 PIG시스템을 소개하였고 시스템의 구성에 대하여 설명하였다. 또한, PIG 시스템에 적합한 항법시스템을 구성하고 스무딩 필터를 이용하여 위치 및 상태에 대한 정보를 오프라인으로 처리하였다, 이러한 전체 시스템의 동작을 실제의 배관 실험을 통하여 확인하였으며 이를 통하여 우수한 항법 성능을 얻을 수 있었다.

† 본 연구는 2000년도 한국가스공사의 지원을 받아 서울대학교 자동화시스템공동연구소와의 공동연구로 이루어졌음

참고문헌(또는 Reference)

[1] 김영근,노용우,고영태,"인텔리전트 피그 활용을 통한 배관 건전성 관리" 1999.

[2]M. COx. et. al. "Pipeline monitoring and remedial action from inertial geometry surveys in buried pipelines," The Pipeline Pigging Conference, 1-14, 1995..

[3]R.L. Wade, J.R. Adams,"An integrated approach for pipeline fitness for purpose determination using corrosion and geometry pipeline pig inspection systems ," Pipe Tech, 1-14, 1995.

[4]J. Czyz, J. Falk,"Use of GEOPIG for prevention of pipeline failure in environmentally sensitive areas," The Pipeline Pigging Conference, 1-18, 2000.

[5]J. Czyz, C. Fraccaroli, "Measuring Pipeline movement in geotechnically unstable areas using an inertial geometry pipeline inspection Pig," 1-14.

[6]이장규,박찬국,한형석, PIG 항법시스템 개발(1차년도) 보고서, 자동화시스템공동연구소 연구보고서, 2001.