

엘보 인식에 의한 배관로봇의 실시간 위치 추정 및 후처리 위치 측정 알고리즘

A Real-time and Off-line Localization Algorithm for an Inpipe Robot by Detecting Elbows

이 채 혁, 김 광 호, 김 재 준, 김 병 수, 이 순 겔*

(Chae Hyeuk Lee¹, Gwang Ho Kim¹, Jae Jun Kim¹, Byung Soo Kim¹, and Soon Geul Lee^{1,*})

¹Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University

Abstract: Robots used for pipe inspection have been studied for a long time and many mobile mechanisms have been proposed to achieve inspection tasks within pipelines. Localization is an important factor for an inpipe robot to perform successful autonomous operation. However, sensors such as GPS and beacons cannot be used because of the unique characteristics of inpipe conditions. In this paper, an inpipe localization algorithm based on elbow detection is presented. By processing the projected marker images of laser pointers and the attitude and heading data from an IMU, the odometer module of the robot determines whether the robot is within a straight pipe or an elbow and minimizes the integration error in the orientation. In addition, an off-line positioning algorithm has been performed with forward and backward estimation and Procrustes analysis. The experimental environment has consisted of several straight pipes and elbows, and a map of the pipeline has been constructed as the result.

Keywords: inpipe robot, dead reckoning, localization, Procrustes analysis, off-line navigation

I. 서론

배관 검사를 위한 로봇은 지금까지 많은 연구가 이루어졌으며, 여러 가지 구조의 이동 로봇들이 배관 내부에서의 작업을 위해 개발되어 왔다[1]. 지금까지의 배관 로봇들은 대부분 사람이 원격으로 조종하는 형태가 대부분이었다[2]. 그러나 세계적으로 부식이나 파손으로 인한 배관의 노후화가 진행됨에 따라, 검사해야하는 배관의 길이가 점점 더 길어졌고, 따라서 자율 주행이 가능한 배관 로봇에 대한 필요성이 높아지고 있다[3].

위치 추정은 로봇의 자율 주행에 있어 가장 중요한 요소 중 하나이다[3]. 그러나 배관 내부라는 특수한 환경으로 인해, 위치 추정에서 주로 쓰이는 GPS나 RFID와 같은 절대 위치 추정 센서의 이용이 불가능하다[4]. 이 사실은 배관 로봇의 위치 추정을 매우 어렵게 만들며, 이는 배관에서의 위치 추정이 추측 항법(dead-reckoning navigation)을 통해서만 이루어져야 한다는 것을 의미한다.

본 논문에서는 직관과 엘보의 판별에 의해 위치 추정오차를 최소화하여 정밀도를 높이는 방법을 제시한다. 크게 직관과 엘보로 구성되어 있는 배관 환경을 고려하면, 추측

항법으로 인한 적분 오차를 최소화 할 수 있다. 이렇게 얻어진 경로 정보를 정방향·역방향 추정과 Procrustes 분석을 이용해 후처리하여 그 정확도를 향상시켰다. 영상 처리, 레이저 포인터, IMU (inertia measurement unit) 센서 그리고 주행거리계가 이 방법에 이용된다.

II. 주행정보 측정 시스템

1. 주행 정보 측정 모듈

본 연구에서는 그림 1와 같은 배관 주행 모듈을 제작하여 위치 추정 실험에 활용하였다. 이 모듈은 뱀 로봇 형태의 배관 로봇에서 주행 정보 측정 모듈만을 분리한 형태이다. 그림 2의 다리 구조에 나타낸 것처럼, 스프링 서스펜션 메커니즘을 이용하여 바퀴들이 배관 내벽에 밀착되게 하였고, 4개의 바퀴를 모듈 앞뒤로 배치하여 모듈과 배관의 중

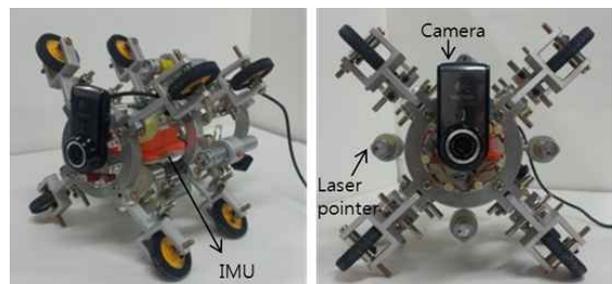


그림 1. 배관로봇 주행기록계 모듈.

Fig. 1. The odometer module for an inpipe robot.

* Corresponding Author

Manuscript received December 5, 2013 / revised April 28, 2014 / accepted August 27, 2014

이채혁, 김광호, 김재준, 김병수, 이순겔: 경희대학교 기계공학과 (darthegg@khu.ac.kr/home3840@hanmail.net/yellowseajun@hanmail.net/poosoo@chol.com/sglee@khu.ac.kr)

※ 본 논문은 지식경제부 산업융합원천기술개발사업(NO.10041629, NO.10040992)에서 지원하여 연구하였음.

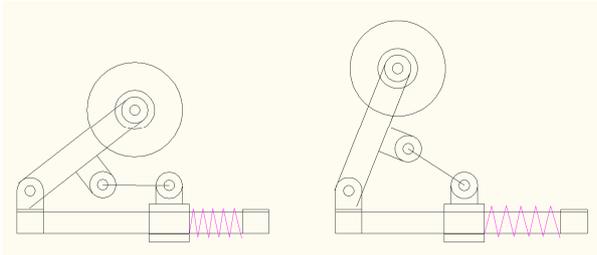


그림 2. 스프링 서스펜션 메커니즘.
Fig. 2. Spring suspension mechanism.

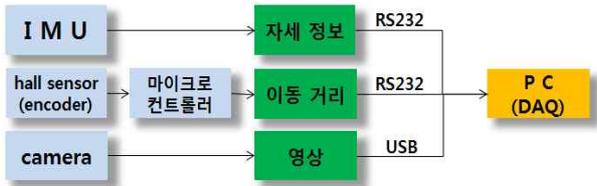


그림 3. 센서 및 측정 데이터.
Fig. 3. Sensors and measured data.

표 1. Xsens MTi AHRS 센서.
Table 1. Specification of Xsens MTi AHRS.

	Biased Drift	20 deg/h
	Resolution	0.05 deg
	Power	350 mW
	Noise	0.05 deg/s

심이 가능한 일치하도록 제작하였다. 모듈의 중앙부에는 Xsens 사의 MTi AHRS 모듈의 IMU를 마운트하여 방위 정보를 측정하였고, 센서 스펙은 표 1과 같다. 바퀴에는 홀센서를 이용한 엔코더를 제작하여 주행거리를 측정하였고, 모듈 전방을 촬영하기 위하여 Logitech 사의 웹캠 905를 로봇 앞면에 장착하였다. 각 센서 데이터들은 그림 3과 같이 RS232 통신과 USB를 이용하여 한 대의 PC에서 동시에 수집된다.

많은 경우, 배관 로봇은 구조상 별도의 주행거리계와 IMU 센서가 내장된 위치 측정모듈과 로봇을 추진하기 위한 구동 모듈로 구성되어 있다. 따라서 본 연구의 배관주행 모듈은 별도의 추진 장치가 없기 때문에 앞면에 와이어를 연결하고 배관 출구에서 와이어를 당기는 방법으로 모듈이 배관 내부를 주행하게 하였다. 와이어는 모터로 구동되는 폴리에 의해 장력을 모듈에 전달하게 되며, 투명한 폴리머 재질의 와이어를 이용하여 카메라의 영상에 영향을 미치지 않도록 하였다.

2. 레이저 마커 모듈

4개의 레이저 포인트가 그림 2와 같이 마운트 되어 있으며 레이저의 방향은 주행 모듈의 방향과 평행하도록 설계 되었다. 레이저는 고가의 산업용 레이저가 아닌 저렴한 프리젠테이션용 일반 레이저 포인트이며, 특수 가공한 렌즈를 통해 그림 4와 같은 원형 모양의 상과 가운데 점의 형태로 레이저가 조사된다.

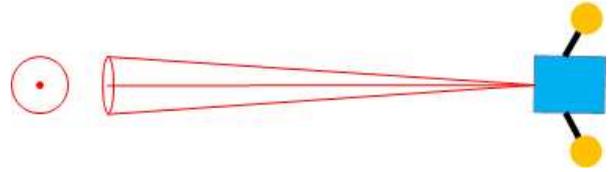


그림 4. 레이저 마커 출력 형상.
Fig. 4. Shape of laser light marker.

III. 경로 추정 알고리즘

1. 직관 및 엘보 구분 경로 추정 방법

1.1 경로 추정 전략

도시가스 배관은 주로 지하에 매설되어 있으며, 이로 인해 GPS나 RFID와 같은 beacon 형태의 절대 위치 측정 센서는 이용이 불가능하다. 절대 위치 측정이 불가능하다는 것은, 추측 항법(dead-reckoning navigation) 만을 이용하여 배관 로봇의 위치를 파악해야 한다는 것을 의미한다. 모바일 로봇이나 차량에서 주로 이용되는 추측 항법 알고리즘은 아래 수식 (1), (2)와 같다. p_n 은 시점 n 에서의 위치, R_n 은 시점 n 에서의 방위 정보를 나타내는 회전 행렬, D_n 은 로봇의 진행방향을 x 축으로 한 시점 n 에서 시점 $n-1$ 까지 로봇 좌표계에서의 변위, d_n 는 시점 n 에서 시점 $n-1$ 까지 주행거리계의 측정값을 의미한다.

$$p_n = p_{n-1} + R_n \cdot D_n \tag{1}$$

$$D_n = [d_n \ 0 \ 0]^T \tag{2}$$

수집되는 정보들 중 추측 항법의 누적 오차에 가장 큰 영향을 끼치는 정보는 방위 정보이다. 만약 로봇이 1 km를 이동할 때 방위 각도의 오차가 1° 발생하게 되면, 도착점에서의 위치오차는 약 20 m 발생하게 된다. 이는 바퀴의 슬립에 의해 보통 발생하는 주행거리계의 병진운동 오차보다 매우 큰 오차이다.

IMU에서 출력되는 각속도 정보를 적분하여 방위각 정보를 구할 수 있는데, 이 적분 과정 때문에 처음에는 미미했던 오차의 영향이 점점 커지게 되어 기하급수적인 오차의 증가를 보이게 된다. 즉 센서 운용 시간이 방위 정보의 오차에 큰 영향을 끼치게 된다. 결국 방위각 정보의 오차를 줄이려면 IMU의 운용 시간을 최소화해야 한다.

배관은 크게 두 가지 요소, 직관과 엘보로 구성되어 있는데, 이 특수한 구조에 착안하여 IMU의 운용 시간을 최소화 할 수 있다. 로봇이 직관을 주행할 시에는 로봇의 방위각의 변화가 IMU의 적분오차에 비해 상대적으로 작다. 처음 방위각을 알고 그 방향으로 이동거리만 갱신하면 로봇의 위치를 파악할 수 있고, 이는 직관을 주행하는 동안은 IMU의 방위각 변화값을 고려할 필요가 없다는 것을 의미한다. 따라서 아래 수식 (3)과 같이, 직관 주행 상태와 엘보 주행 상태를 구분하여, 직관 주행 시에는 회전 행렬 R 을 상수로 일정하게 유지하고, 엘보 주행 시에만 IMU의 방위각 변화를 고려하여 로봇의 방위 정보를 갱신하면 누적 오차를 크게 줄일 수 있다.

$$p_n = \begin{cases} p_{n-1} + R \cdot D_n & : \text{직관} \\ p_{n-1} + R_n \cdot D_n & : \text{곡관} \end{cases} \quad (3)$$

직관과 엘보 구분 경로 추정 방법은 직관 정렬 및 주행, 엘보 인식, 재정렬 후 엘보 주행, 엘보 탈출 판단의 총 4 단계의 절차로 이루어진다.

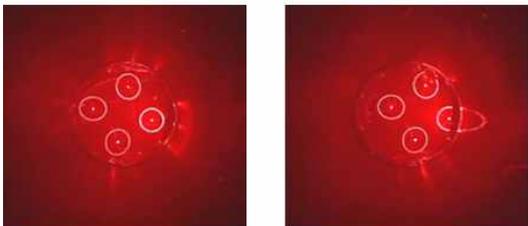
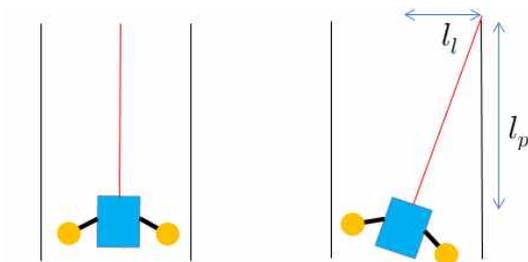
1.2 로봇-직관 정렬 및 주행

모듈의 초기 위치를 저장한 후 모듈의 진행 방향과 직관의 축 방향이 평행한지 확인한다. 이를 확인하는 것은 본 연구의 경로 추정 방법이 직관 초기에만 방위 정보를 저장한 후 이후에는 이를 갱신하지 않기 때문에, 초기 방위 정보의 정확도가 중요하기 때문이다.

정렬 여부는 카메라의 영상 정보와 레이저 마커를 이용하여 판단한다. 직관과 모듈이 정렬되었을 경우 그림 5(a)와 같은 형태로 레이저 마커가 모두 온전한 형상으로 얻어진다. 직관과 모듈이 정렬되지 않았을 경우에는 그림 5(b)와 같이 레이저 마커가 일그러진 형태로 영상이 얻어진다. 이러한 일그러짐을 이용하여 직관과 모듈의 정렬 여부를 판단한다. 레이저 마커 형태의 일그러짐은 Matlab의 영상 처리 툴박스를 이용하여 판단하였다. 정렬 판단 방법의 정확도는 아래 수식 (4)에 의해 추정 될 수 있다. e_a 는 정렬 시 발생 가능한 최대 오차, l_l 는 레이저포인터에서 배관 벽 간 거리, l_p 는 레이저가 닿을 수 있는 직관 최대 거리를 의미한다. 직관이 3 m 일 경우, 수식 (4)에 의해 최대 오차는 0.57°인 것을 확인 할 수 있고, 이는 충분히 허용 가능한 오차이다.

$$e_a = \tan^{-1} \left(\frac{l_l}{l_p} \right) \quad (4)$$

정렬이 확인되면 그 상태의 방위각 정보를 저장한 후, 더 이상 IMU의 방위 정보를 갱신하지 않는다. 위치 추정은 수식 (3) 중 직관의 경우를 이용하여 이루어진다.



(a) When the robot is aligned with the pipe. (b) When the robot is not aligned with the pipe.

그림 5. 레이저 포인터 주사영상. Fig. 5. The projected images of the laser pointer.

1.3 레이저 마커를 이용한 엘보 인식

모듈이 엘보 가까이 접근하게 되면, 그림 6과 같이 배관 내벽에 레이저 상이 맺히게 된다. 엘보 진입 파악은 이러한 레이저 상의 변화 중 그림 6의 두 마커 간 거리 l_s 를 이용하여 판단하게 된다. 그림 7는 레이저 마커가 닿는 엘보 내벽을 로봇 진행 방향과 수직인 평면이라 가정하고, 모듈의 카메라를 핀홀 카메라로 단순화하여 나타낸 개략도이다. s 를 레이저 포인터 간 거리, f_l 를 핀홀 카메라의 초점 거리(focal length)라 할 때, 모듈과 엘보 간 거리 d 는 아래 수식 (5)에 의해 산출된다. 이렇게 산출된 거리 d 를 이용하여 엘보와의 거리를 추정하고, 엘보 진입을 판단한다.

$$d = \frac{f_l \cdot s}{l_s} \quad (5)$$

여기서 두 마커 간 거리는 4개의 레이저 마커에서 2개의 마커를 선택하여 이루어지는 것이므로, 총 6개의 마커 간 거리를 얻을 수 있다. 이렇게 얻은 6개의 마커 간 거리 중 가장 짧은 거리를 l_s 로 선정한다. 이는 가장 짧은 거리를 이루는 레이저 마커들이 닿는 엘보 내벽 부분이 가장 모듈의 진행 방향과 수직인 평면에 가깝기 때문이다. 레이저 마커 간 거리는 Matlab의 영상 처리 툴박스를 이용하여 산출된다.

1.4 로봇-직관 재정렬 후 엘보 주행

엘보 인식 후에는 엘보 진입까지 1 m 남은 위치에서 다시 1.2 절의 정렬 판단 알고리즘을 수행한 후, IMU의 방위 정보에 의한 방위각 갱신을 재 시작한다. 이때 IMU 방위 정보의 초기값은 바로 이전의 직관 주행 전 저장한 방위

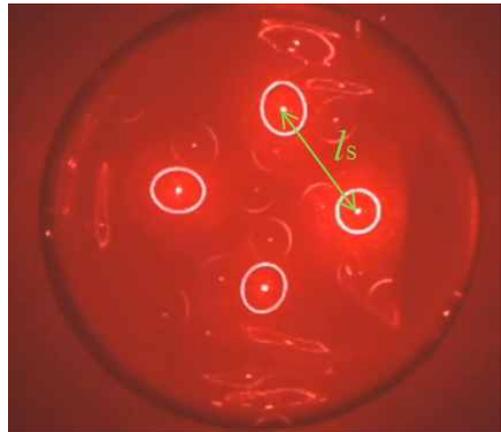


그림 6. 엘보 내벽에 맺힌 레이저 마커 상. Fig. 6. Laser marker light projected on the surface of an elbow.

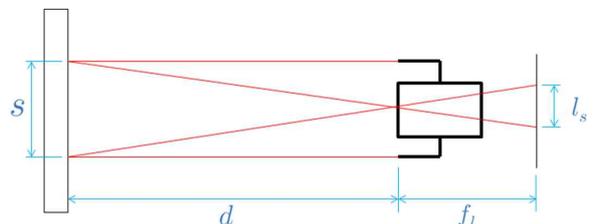


그림 7. 핀홀 카메라 모델을 이용한 거리 계산. Fig. 7. Distance calculation with a pin-hole camera model.

정보와 같다. 엘보 주행 시의 위치 추정은 수식 (2)의 엘보의 경우를 이용하여 이루어진다.

1.5 IMU를 이용한 엘보 탈출 판단

엘보 탈출은 IMU에서 출력되는 각속도 정보를 이용하여 판단한다. 각속도는 IMU 내부의 자이로 센서만을 단독으로 이용하여 측정된 값이며, 측정된 각속도 신호는 저주파 통과 필터를 통과한 후 로봇에 전송된다. 폴리 모터의 일정한 속도와 로봇 바퀴의 스프링 서스펜션 구조로 인하여, 엘보 통과 시 IMU에서 출력되는 각속도에 일정한 변화 패턴이 나타나게 된다. 그림 8은 엘보 통과 시의 이러한 각속도의 변화를 나타낸 것이다.

엘보 탈출 판단은 두 단계를 거쳐 진행된다. 각속도의 크기가 일정 경계값을 넘어가면 이를 이벤트 1이라 칭한다. 로봇 모듈의 진행 방향 길이를 l_{robot} 이라 할 때, 로봇이 이벤트 1 시점부터 $l_{robot}/2$ 만큼 주행하는 동안 이벤트 1이 같은 방향으로 나타나면, 이를 이벤트 2라 한다. 이벤트 2가 발생되었을 때는 로봇이 아직 엘보를 주행하고 있는 상태라는 것을 의미한다. 이벤트 2가 판정되면, 이벤트 2가 판정된 시점부터 다시 엘보 탈출 판정 과정을 수행하고, 이전 과정의 이벤트 2를 이벤트 1로 설정한다. 이벤트 2가 일정 거리를 주행해도 발생되지 않으면, 로봇이 엘보를 탈출했다고 판단할 수 있다. 단 이벤트 1, 2는 모두 주행거리계의 값이 증가하고 있을 때만 적용된다. 이는 엘보의 구조로 인해 주행하고 있지 않음에도 로봇의 자세가 기울어지는 경우를 구분하기 위해서이다.

모듈이 엘보를 탈출하여 직관에 진입하였다고 판단되면, 1.2절의 정렬 판단을 다시 수행한 후, 1.2절에서 1.5절의 단계를 반복한다.

2. 후처리 알고리즘

2.1 정방향·역방향 경로 추정

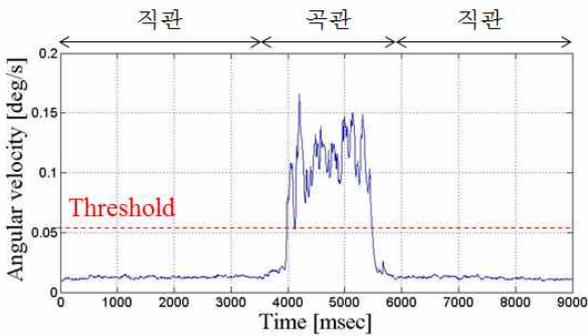
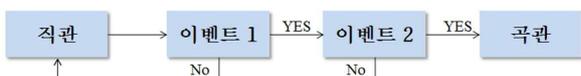


그림 8. 엘보에서의 각속도 변화.

Fig. 8. Angular velocity change in an elbow.



이벤트 1 : Threshold 보다 큰 각속도 확인
이벤트 2 : $l_{robot}/2$ 거리를 주행하는 동안 이벤트 1이 같은 방향으로 발생

그림 9. 배관 주행 모듈 엘보 주행 여부 판단.

Fig. 9. The process determining whether the module is in an elbow.

추측 항법만으로 이루어진 위치 추정 데이터를 후처리 및 보정 할 때, 가장 많이 쓰이는 방법 중 하나는 시간 순 위치 추정 데이터(정방향)와 시간 역순 위치 추정 데이터(역방향)를 서로 보정하는 것이다[5]. 이 방법을 적용하기 위해서는 로봇의 초기 위치와 최종 도착 위치를 정확하게 알고 있다는 가정이 필요하다. 실제 배관 로봇이 현장에 적용될 경우 투입 시 초기 위치의 배관을 지면 밖으로 노출시키고, 마찬가지로 로봇 회수 시에도 해당 위치 배관을 지면 밖으로 노출시킨다. 배관이 지면 밖으로 나온다는 것은 해당 위치를 정확하게 파악할 수 있다는 의미이므로 초기 위치와 최종 위치를 정확히 알고 있다는 가정은 성립된다.

정방향 위치 추정은 앞서 설명한 직관과 엘보 구분 경로 추정 방법으로 이루어진다. 역방향 위치 추정은 최종 위치를 초기 위치로 설정하고, 비디오 동영상을 뒤로 돌리듯 시간 역순으로 방위와 이동 거리 정보를 갱신하여 위치 추정을 진행하는 것이다. 초기 위치와 정보 갱신 순서의 차이 때문에 정방향 위치 추정은 초기 위치에서 멀어질수록 오차가 증가하는 반면에, 역방향 위치 추정은 최종 위치에서 멀어질수록 오차가 증가한다. 수식 (6)은 각각 정방향과 역방향의 위치 추정을 나타낸다.

$$p_n = \begin{cases} p_{n-1} + R_n \cdot D_n [p_{start}, p_{end}] & : \text{정방향 추정} \\ p_{n-1} - R_n \cdot D_n [p_{end}, p_{start}] & : \text{역방향 추정} \end{cases} \quad (6)$$

2.2 정·역방향 경로 보정 알고리즘

정방향 경로 추정은 초기 위치에서 멀어질수록, 즉 시간이 흐를수록 그 정확도가 감소하는 양상을 보이고, 역방향 경로 추정은 최종 위치에서 초기 시간으로 갈수록 그 정확도가 감소한다. 따라서 아래 수식 (7)과 같이 시간에 따라 증가하는 1차 함수 형태의 가중치 ω_t 를 이용하여 두 경로의 정확도가 높은 구간만으로 이루어지는 새로운 보정 경로 S_n 을 얻을 수 있다.

$$S_{n,t} = (1 - \omega_t) S_{f,t} + \omega_t S_{b,\tau}$$

$$\omega_t = \frac{t}{t_{max}} \quad (7)$$

$$\tau = t_{max} - t$$

여기서 $S_{n,t}$ 은 시간 t에서의 보정 경로, $S_{f,t}$ 는 정방향 추정 경로, $S_{b,\tau}$ 는 역방향 추정 경로, t_{max} 는 최종 샘플링 시간을 의미한다.

하지만 단순히 시간 가중치만을 이용하여 두 경로 데이터를 합치면 짧은 이동 거리에서 모듈 위치의 미세한 변화가 무시되거나 상쇄될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Procrustes 분석을 이용하여 정역방향 경로 추정의 정확도가 높은 구간만을 활용하면서도, 모듈 위치의 미세한 변화도 추정 경로에 적용될 수 있도록 한다.

Procrustes 분석이란 최소자승법(least square method)의 응용 중 하나로서, 서로 다른 두 개의 면이나 선과 같은 형상을 일치시키는데 주로 이용된다. 주어진 형상 X 와 B 가 있을 때, 두 형상의 무게 중심의 차이 T 를 구하고(translation), 수식 (8)의 값이 최소가 되는 행렬 Q 를 크기(scale), 회전(rotation)의 두 가지 요소에 대해 최소자승법을 수행하여 산

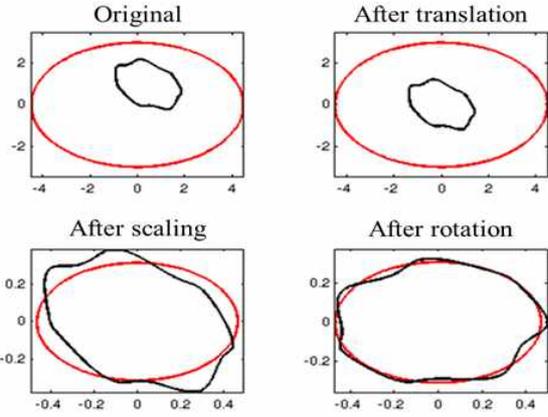


그림 10. Procrustes 분석.
Fig. 10. Procrustes analysis.

출하는 것을 의미한다. 이렇게 얻은 위치, 크기, 회전 요소 T , Q 를 형상 X 에 적용하면 형상 B 와 위치, 크기, 방위가 유사한 새로운 형상을 얻을 수 있다[6].

$$\|QX - B\|^2 \quad (8)$$

그림 10에서 볼 수 있듯이, Procrustes 분석을 적용하더라도 형상의 위치, 크기, 방위를 제외한 특성들은 모두 유지된다. 따라서 본 연구에서는 보정 경로 S_n 을 넓은 간격의 샘플링 시간으로 산출하고, 정방향 경로 추정 데이터 S_f 를 S_n 에 대해 Procrustes 분석을 수행한 후 그 결과를 수식 (9)와 같이 정방향 경로 S_f 에 적용하여 최종 추정 경로 S_p 를 얻는다. Q_{sc} , Q_{ro} 은 각각 S_n 에 대한 S_f 의 크기, 회전 Procrustes 분석 결과를 의미하고, T_{nf} 는 S_f 와 S_n 의 무게 중심의 차를 의미한다[8].

$$S_p = Q_{ro}Q_{sc}S_f + T \quad (9)$$

IV. 실험 결과

1. 실험 구성

실험은 두 가지 경우로 이루어졌다. 그림 11과 같이 첫 실험은 3 m 직관, 1.5D 엘보, 3 m 직관의 순서로, 두 번째 실험은 2 m 직관, 1.5D 엘보, 2 m 직관, 1.5D 엘보, 2 m 직관 이루어진 배관 환경에서 수행되었다. 배관의 직경은 실제 현장에서 가장 많이 쓰이는 8인치, 16인치 배관 중 8인치 배관으로 선정되었다. 그림 12와 같이 로봇의 진행을 확

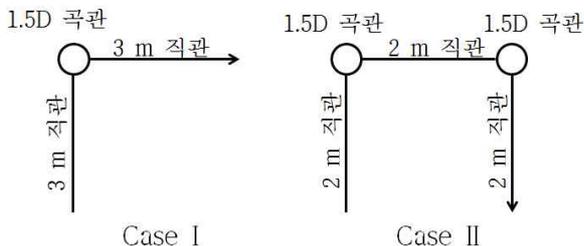


그림 11. 실험 배관 구성.
Fig. 11. Pipeline configurations for experiment.

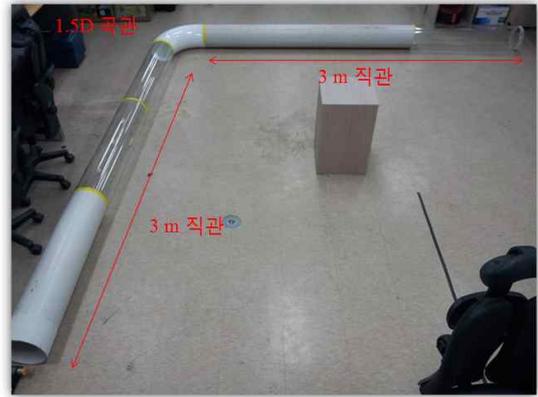


그림 12. 실험 배관.
Fig. 12. An experimental pipeline.

인하기 위하여 부분적으로 아크릴로 제작된 투명관을 이용하였고, 레이저 마커가 닿을 것으로 예상되는 구간에는 불투명한 관을 이용하였다. 모듈의 주행 속도는 뱀로봇 형태의 배관 로봇들의 평균적인 속도인 2 cm/s 를 유지하도록 설정하였다.

2. 실험 결과

실험 결과는 초기 위치부터 최종 위치까지의 배관 로봇의 이동 경로로서, 총 세가지 방법으로 처리되었다.

첫 번째 결과는 기본적인 추측 항법으로 처리된 결과로서, IMU에서 출력되는 회전 행렬 정보와 로봇의 주행거리계 정보만을 이용하여 얻어진 결과이다.

두 번째 결과는 직관 및 엘보 구분 경로 추정 방법이 적용된 결과로서, IMU와 주행거리계에서 얻은 정보 뿐만 아니라, 레이저 마커 영상을 이용해 측정된 엘보와의 거리 정보와 IMU의 각속도 신호를 이용한 엘보 탈출 판단 정보를 이용하여 얻은 결과이다.

세 번째 결과는 두 번째 결과를 Procrustes 분석을 이용한 후처리 알고리즘으로 보정하여 얻어진 결과이다.

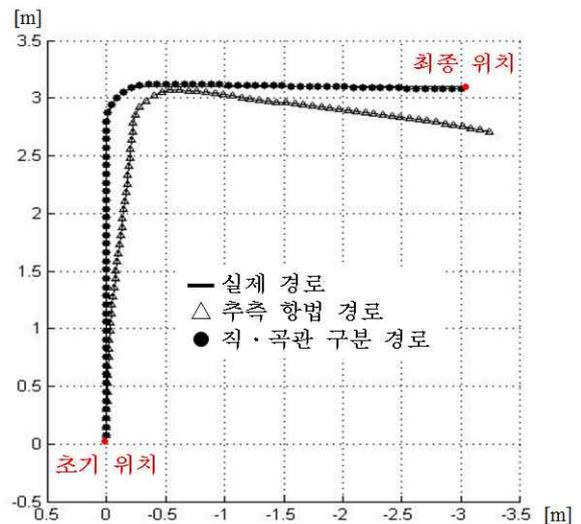


그림 13. Case I 실험 결과 (엘보 감지 방법 적용).
Fig. 13. The result of Case I (Elbow detection method applied).

그림 13은 첫 실험의 실제 배관 경로, 추측 항법만으로 추정된 경로, 직관 및 엘보 구분 경로 추정 방법을 적용하여 추정된 경로를 나타낸 것이다. 추측 항법만으로 추정된 경로 보다 직관 및 엘보 구분 방법을 적용하였을 때 실제 배관 경로에 더 가까운 결과가 얻어지는 것을 확인할 수 있다.

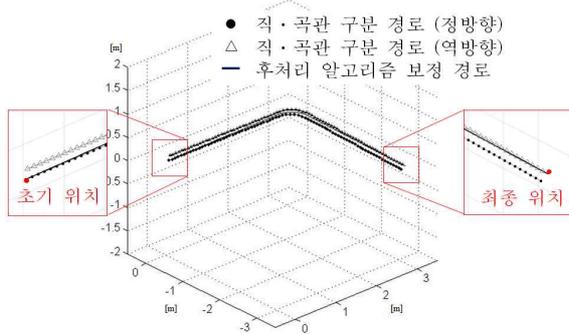


그림 14. Case I 실험 결과 (시간 가중치 및 보정 적용).

Fig. 14. The result of Case I (weighting factor and compensation applied).

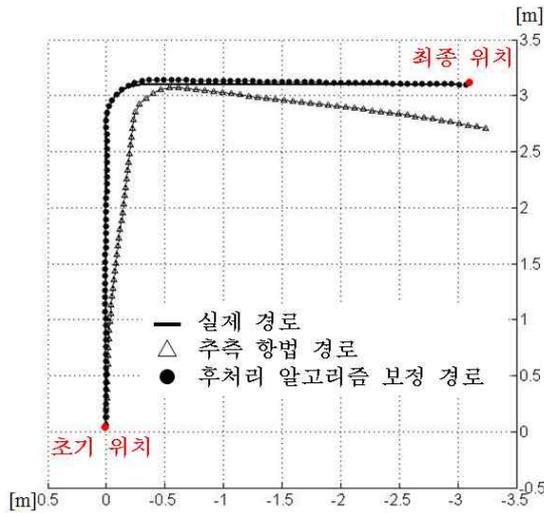


그림 15. Case I 실험 결과 (후처리 보정 적용).

Fig. 15. The result of Case I (off-line compensation applied).

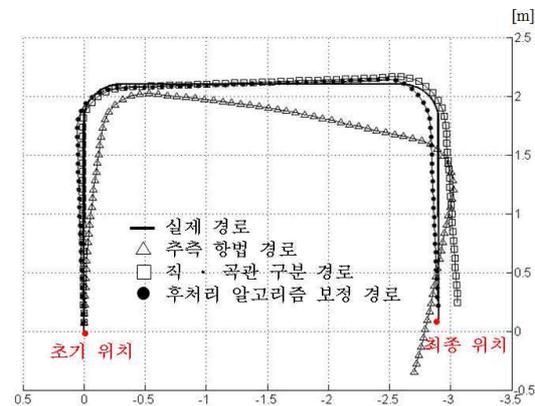


그림 16. Case II 실험 결과.

Fig. 16. The result of Case II.

그림 14는 첫 실험의 정방향 추정 경로, 역방향 추정 경로, Procrustes 분석을 이용한 후처리 알고리즘으로 보정된 경로를 나타낸 것이다. 배관 모듈의 초기 위치와 최종 위치를 확대하여 나타내었는데, 초기 위치 부근에서는 정방향 추정 경로와 후처리 알고리즘 보정 경로가 차이가 거의 없고, 최종 위치 부근에서는 역방향 추정 경로와 후처리 알고리즘 보정 경로가 차이가 크지 않을 것을 확인할 수 있다. 이는 시간 가중치와 Procrustes 분석을 이용한 보정이 제대로 적용되었음을 의미한다.

그림 15는 첫 실험의 실제 배관 경로, 추측 항법만으로 추정된 경로, 후처리 알고리즘으로 보정된 경로를 나타낸 것이다. 후처리 알고리즘으로 보정하였을 때 정확도에서 큰 향상을 보이는 것을 확인할 수 있다.

그림 16은 두 번째 실험의 실제 배관 경로, 추측 항법만으로 추정된 경로, 엘보 구분 방법을 적용한 경로, 후처리 알고리즘으로 보정된 경로를 표현한 것이다. 추측 항법 경로, 엘보 구분 방법 적용 경로, 후처리 보정 경로 순으로 경로 추정 정확도가 향상되는 것을 확인할 수 있다.

표 2는 각 실험 당 5번의 실험을 수행한 후, 각 경우의 평균 오차와 최대 오차를 나타낸 것이다. 오차는 초기 위치에서 시점 t 까지의 주행거리계 측정 거리만큼 실제 배관 경로를 따라간 위치와 시점 t 에서의 각 추정 경로의 위치의 차를 이용하여 산출되었다. 주행거리계의 값은 오차가 없다고 가정한다.

오차를 살펴보면, 단순 추측 항법을 이용한 경로보다 엘보 인식 방법이 적용된 경로에서 평균 오차와 최대 오차가 약 70% 이상 감소된 것을 확인할 수 있다. 후처리 알고리즘까지 적용되면 단순 추측 항법이 적용된 결과보다 오차가 약 80% 감소된다. 첫 번째 실험과 두 번째 실험을 비교하였을 때, 엘보의 개수가 많을수록 오차가 더 커지는 경향이 있는 것을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 연구에서는 배관 로봇의 경로 추정 오차를 실시간 및 후처리를 통해 감소시키는 연구를 수행하였다.

특별한 센서의 추가 없이 배관 로봇에서 주로 이용되는 센서만을 이용하여 경로 추정 성능을 향상시켰다. 직관과 엘보의 구분 방법을 이용하여 IMU의 운용 시간을 최소화 하고, 이를 통해 IMU의 방위 오차를 감소시켜 후처리 이전의 실시간 경로 추정의 성능을 향상시켰다.

여기에 시간 가중치를 이용한 정방향 및 역방향 경로 보정과 Procrustes 분석을 이용한 후처리를 통하여 경로 추정의 정확도를 더욱 향상시켰다.

후처리 알고리즘은 로봇의 위치 추정 정확도를 실시간으로 향상시킬 수 없다는 단점이 있다. 그러나 실제 배관 유지 및 보수 작업이 이루어질 때, 배관 내부의 검사가 모두 완료된 후 유지 보수가 이루어진다. 즉 배관 로봇이 지정 경로를 완전히 통과한 후 보수 작업이 수행된다. 따라서 로봇 위치의 실시간 추정보다는 로봇의 주행 및 검사 완료 후 정확한 위치 추정이 더 중요하다. 따라서 본 논문에서 제시하는 후처리 알고리즘은 실제 배관 유지 보수 환경에서 위치 특정 정확도의 향상을 기대할 수 있다.

REFERENCES

- [1] S. G. Gon and H. R. Choi, "Automated technology for pipeline inspection using inpipe robot," *Journal of Korean Society of Nondestructive Testing*, vol. 22, no. 3, 2002.
- [2] X. Li and S. S. Iyengar, "On optimizing autonomous pipeline inspection," *Transactions on Robotics*, vol. 28, no. 1, 2012.
- [3] A. Ahrary and M. Ishikawa, "A laser scanner for landmark detection with the sewer inspection robot KANTARO," *Proc. of the 2006 IEEE/SMC International Conference on System of Systems Engineering*, 2006.
- [4] S. S. Park and Y. W. Rho, "Development of the odometry system for the intelligent PIG," *Conference of Korean Society of Mechanical Engineering*, pp. 222-227, 2001.
- [5] D. J. Hyun and H. S. Yang, "Dead-reckoning sensor system and tracking algorithm for 3-d pipeline mapping," *Mechatronics*, vol. 20, no. 2, pp. 213-223, 2010.
- [6] T. Viklands, "Algorithms for the weighted orthogonal procrustes problem and other least squares problems," Ph.D. dissertation, Dept. Comput. Sci., Umea University, Umea, Sweden, 2006.
- [7] Alex Townsend. (2011, Aug.). *Procrustes Shape Analysis* [Online], Available: <http://www.chebfun.org>
- [8] J. Yu, J. G. Lee, and C. G. Park, "An off-line navigation of a geometry PIG using a modified nonlinear fixed-interval smoothing filter," *Control Engineering Practice*, vol. 13, no. 11, pp. 1403-1411, 2005.
- [9] P. V. Unnikrishnan, B. Thornton, T. Ura, and Y. Nose, "A conical laser light-sectioning method for navigation of autonomous underwater vehicles for internal inspection of pipelines," *OCEANS '09*, pp. 1-9, 2009.
- [10] M. Kolesnik, "Visual orientation in the sewer - adaptation to the environment," *International Conference on Pattern Recognition*, vol. 16, no. 2, pp. 856-859, 2002.
- [11] S. G. Roh, D. W. Kim, J. S. Lee, H. P. Moon, and H. R. Choi, "In-pipe robot based on selective drive mechanism," *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 7, no. 1, pp. 105-112, 2009.

**이 채혁**

2012년 경희대학교 기계공학과 졸업. 2014년 동 대학 기계공학과 석사. 관심분야는 로봇제어 및 응용, 머신비전, 기계학습.

**김 광호**

2012년 한서대학교 항공기계과 졸업. 2012년~현재 경희대학교 기계공학과 석사 과정 재학. 관심분야는 센서 및 제어 계측.

**김 재준**

2006년 동의대학교 메카트로닉스과 졸업. 2009년 경희대학교 기계공학과 석사. 2012년~2013년 한국생산기술연구원. 2009년~현재 동 대학 기계공학과 박사과정 재학. 관심분야는 로봇제어 및 응용, 머신비전, 기계학습.

**김 병수**

1991년 서울과학기술대 기계설계과 졸업. 1993년 경희대학교 기계공학과 석사. 2011년 동 대학 박사. 2011년~현재 경희대학교 기계공학과 박사후연구원. 관심분야는 Mobile & Walking Robot.

**이 순걸**

1983년 서울대 기계공학과 졸업. 1985년 KAIST 대학원 석사. 1993년 Univ. of Michigan 박사. 1994년~1996년 KIST 휴먼로봇센터 선임연구원. 1996년~현재 경희대학교 기계공학과 교수. 관심분야는 로봇 제어, 메카트로닉스, 인체공학.