벽면 이동 로봇을 이용한 벽면 균열 위치추정에 관한연구

김현섭*, 박재민*, 신동호*, 김형훈** , 김상훈*
*한경대학교 전기전자제어공학과
**삼성전자
e-mail : kimsh@hknu.ac.kr

A Study on Wall Position Estimation Using Wall Mobile Robot

Hyun-Seop Kim*, Jae-Min Park*, Dong-Ho Shin*, Hyung-Hoon Kim**
Sang-Hun Kim*
*Dept of Electrical, Electronic and Control Engineering, Hankyong National University
**Samsung Electronics Co., Ltd

요 약

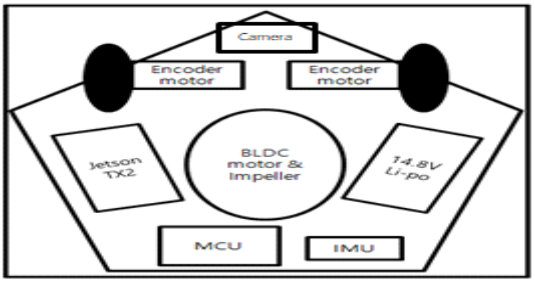
본 논문은 진공을 이용한 흡착방식과 바퀴형 이동방식을 사용하는 벽면이동로봇의 균열 위치 추정에 관한 연구로써, 로봇의 Yaw값에 대해 PID제어를 통해 로봇의 방향을 제어 하고 이를 바탕으로 엔코더 모터의 홀센서와 IMU를 기반으로 하여 균열 위치를 추정 한다. 위치 추정 성능을 검증하기 위해 실제 위치와 추정된 위치를 비교하고 결과를 제시하였다

1. 서론

문명과 산업이 발달함에 따라 자연스럽게 생긴 대형 구조물들이 우리 주변에서 차지하는 역할이 매우 중대해졌으며, 이와 더불어 그것들의 유지 및 보수 작업의 필요성 또한 중대해졌다. 대형 구조물들은 인류의 생활 어느 곳에서도 쉽게 볼 수 있다. 고층 아파트가 없는 도시가 없으며, 작은 다리 하나 없는 강은 찾아보기 힘들뿐더러, 컨테이너 선박과 대형 여객기가 없이는 지금의 활발한 산업 활동이 존재할 수 없다. 이러한 대형 구조물들이 인류의 삶에 미치는 지대한 영향으로 인하여, 이러한 것들의 안전과 그 성능에 대한 검사 및 유지보수가 필요성에 의해 지속적으로 수행되어 왔다. 과거에도 수많은 대형 참사, 특히 교량붕괴와 건축물의 붕괴 등으로 인한 인명 및 재산피해는 이러한 검사 및 유지보수 작업의 필요성을 잘 설명해 주고 있다. 그러나 그 규모의 문제로 인하여, 과거 지금까지 행하여져 온 많은 검사작업들이 매우 위험한 환경에서 수행되어져 왔으며, 작업의 효율성 역시 높지 못하다. 교량 및 교각을 검사하기 위하여, 임시 구조물을 설치하는가 하면, 건물의 상층부에서부터 매달려 내려오면서 작업하는 위험한 방식도 행해지고 있다. 이러한 과정은 검사작업자 이외의 부가적인 인력과 비용을 필요로 하며, 소요시간 또한 실제 검사에 필요한 시간에 비해 수십 배에 이른다. 이러한 검사 및 보수 작업의 위험성과 그 효율의 비합리를 해소하기 위해 로봇을 이용한 검사작업이 제안되었다. 로봇을 이용한 작업자가 작업환경 속에서 처하게 될 위험을 로봇이 대신함으로써 작업자의 안전을 보장할 수 있으며 부가적인 시설물의 설치를 필요로 하지 않고, 이러한 로봇이 균열의 위치를 파악함으로 작업의 비용 및 시간을 현저히 줄일 수 있다[1][2][3][4].

2. 벽면 이동 로봇

벽면 이동 로봇[Fig.1]은 BLDC motor 구동으로 Impeller가 회전하여 Chamber내의 저기압을 형성하여 벽면에 부착하고 두 개 의 Encoder motor구동으로 이동한다. Embedded Software Platform인 Jetson TX2를 이용하여 영상처리 및 머신러닝을 로봇 내에서 구현하여 카메라로 균열을 검출하고 MCU는 Encoder motor, BLDC motor를 제어하며 IMU, Jatson TX2 와 통신하여 IMU에서 Yaw값을 받고 균열위치를 추정하여 Jetson Tx2에 보낸다.



[Fig.1] 벽면 이동 로봇

3. 이동 방향 제어

벽면 이동 로봇은 중력 ,로봇의 무게중심, 벽면의 굴곡짐, 구동 모터의 오차 및 틀어짐 등에 의해 처음 이동방향에 오차가 누적된다. 정밀한 이동 방향 제어를 하기 위해 로봇의 Yaw값에 대해 PID제어 가 필요하다. PID 제어기의 이득이 정확히 설정되지 않을 경우, 시스템의 응답속도가 느리거나 시스템의 진동 발생, 원하는 정밀도 얻을 수 없으므로 제어 시스템의 이득 설정은 중요하다. 정확한 모델의 해석을 바탕으로 동조하는 방법으로 주파수 응답법[10], 극 배치법, 극-영점 상쇄 등이 있지만 정확한 모델의 해석이 어려운 경우에 는 사용하지 못한다. 불확실한 모델에도 제어기의 PID 계수를 동조 할 수 있는 Ziegler-Nichols의 동조법을 사용하였다.[9] 전달함수(C(s))는 식 (1)으로 표현될 수 있다. K_p는 비례계수, T_i는 적분시간, T_d는 미분시간 이다.

$$C(s) = K_p(1+\frac{1}{T_i s}+T_d s) \tag{1}$$

$T_i=\infty, T_d=0$으로 놓고 주어진 제어기의 P제어기만 적용하여 K_p값을 0부터 증가시키면서 출력에 지속 진동이 나타나는 임계이득(K_{cr})에까지 이르게 한다. 이때의 임계주기(P_{cr})을 구한다. $K_p=20$ 일 때 지속 진동이 나타났고 P_{cr}과K_{cr} 은 식 (2)와 같이 정의된다.

$$P_{cr}=30{,}550ms-2{,}675ms=27{,}875ms$$
$$K_{cr}=2K_p=40 \tag{2}$$

따라서 제어기의 K_p, T_i, T_d 식 (3)과 같이 정의된다.

$$K_P=0.6K_{cr}=24$$
$$T_i=0.5P_{cr}=13.9375$$
$$T_i=0.125P_{cr}=3.484375 \tag{3}$$

최종 전달함수는 식 (4)과 같이 표현 될 수 있다.

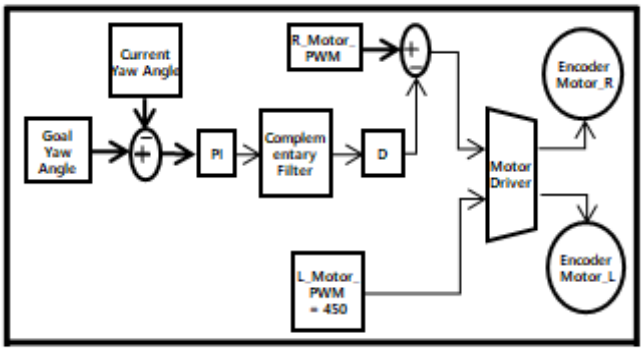
$$C(s)=K_p(1+\frac{1}{T_i s}+T_d s)=\frac{83.625s^2+24s+1.722}{s} \tag{4}$$

Ziegler-Nichols의 동조법은 [Table.1]과 같다.

제어기 종류	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{1}{1.2}P_{cr}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

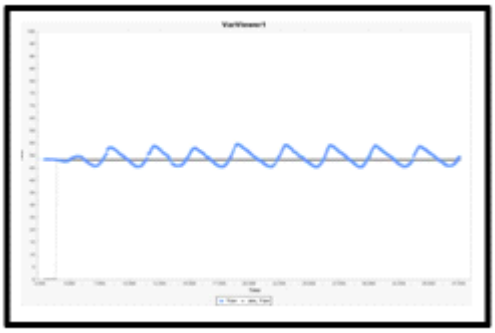
[Table.1] Ziegler-Nichols의 동조법

[Fig.2]는 제어대상(R_Motor_PWM)에 식 (4)와 같은 최종 전달함수를 적용하여 목표Yaw값에 명령추종이 되도록 하였다. PI제어 한 후에 상보필터를 적용한 D제어를 더해 외란에 대한 오차를 최소화 하였다.



[Fig.2] PID Control Algorithm

[Fig.3]는 로봇의 Yaw값에 대하여 $T_i=\infty, T_d=0$으로 놓고 P제어기만 적용하여 K_p=20일 때 STMstudio로 측정한 사진이다.



[Fig.3] Sustained oscillation

4. 위치추정

로봇의 위치추정 기법은 GPS, Beacon[5], WiFi의 신호를 이용한 기법[6] 등의 여러 기법이 존재하는데 그 중, 본 논문에서는 홀센서와 IMU를 기반으로 하는 위치추정 기법[7, 8]을 사용한다. 벽면에 로봇의 출발 시점을 원점 (X_0, Y_0)으로 하는 cm 단위의 2차원의 가상 좌표를 설정하고 이에 따른 위치 좌표를 표현하는 방식을 사용한다. 로봇의 이동거리는 차동 엔코더 모터의 홀센서에서 출력되는 Pulse 값을 이용한다. 차동 엔코더 모터 한바퀴에 발생하는 총 Pulse 값은 엔코더 모터의 감쇠비가 ζ, 엔코더 기어비가 g 에 따라 달라진다. 로봇에 사용하는 엔코더 모터의 감쇠비가 ζ, 엔코더 기어비가 g, r을 바퀴의 반지름, p를 Pulse의 상승, 하강 엣지를 검출한 횟수, V_R와 V_L을 오른쪽, 왼쪽 엔코더 모터라 했을 때 로봇의 이동 거리(D)는 식(5)으로 표현될 수 있다.

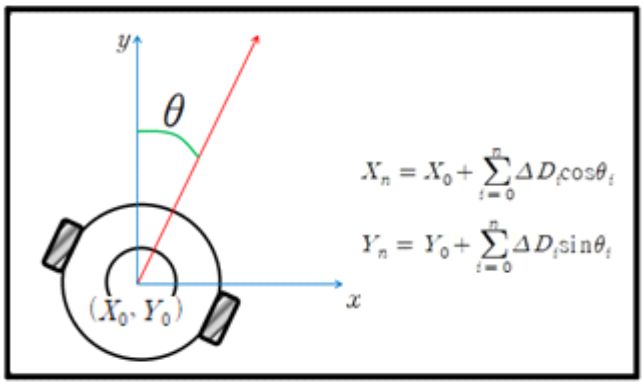
$$\Delta V=\frac{p_i-p_{i-1}}{\frac{1}{\zeta}\times\frac{1}{g}\times 2\times 2}$$
$$\Delta D_i=2\pi r(\frac{\Delta V_R+\Delta V_L}{2})$$
$$D_n=\sum_{i=0}^{n}\Delta D_i \tag{5}$$

차동 엔코더를 사용함으로 모터의 회전방향을 알 수 있다. 두 개의 엔코더 모터의 회전 방향이 같을 경우에는 로봇

이 제자리 회전중 이므로 이동 거리에 영향이 주지 않도록 하였다. 홀 센서를 이용하여 로봇의 회전각을 구할 수 있으나 바퀴의 미끄러짐 들에 의해 오차가 크다. 따라서 [Fig 4.]과 같이 IMU에서 측정한 로봇의 각도(θ)와 홀센서에서 측정한 이동 거리(D)를 이용하여 최종적으로 오차를 보정하고 식 (6)으로 위치(X_n, Y_n)를 추정한다.

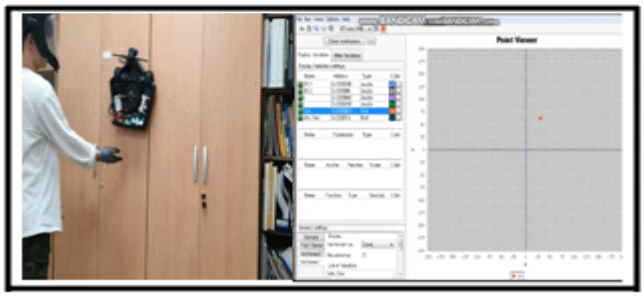
$$X_n = X_0 + \sum_{i=0}^{n} \Delta D_i \cos\theta_i$$

$$Y_n = Y_0 + \sum_{i=0}^{n} \Delta D_i \sin\theta_i \qquad (6)$$



[Fig.4] Two Dimensions Localization

카메라로 균열이 감지되었을 때 따라서 로봇의 위치 추정에서 추정된 위치 좌표의 원점은 엔코더 모터의 정중앙이 된다. 이를 이용하여 IMU의 다양한 방향각 측정 센서로부터 현재 로봇의 자세에 대한 정보를 판단하여 상황에 맞게 엔코더 모터의 현재 좌표에서 카메라와 로봇의 거리(cm)를 빼면 균열의 위치를 알 수 있다. [Fig.5]는 추정 균열 위치를 STMStudio로 측정한 사진이다.

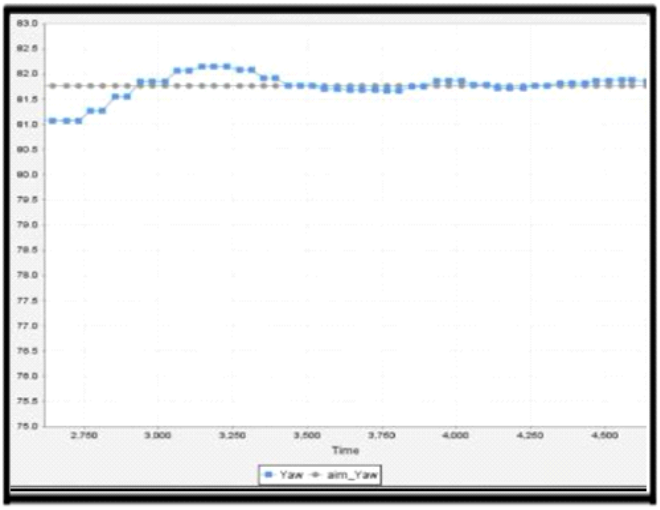


[Fig.5] Crack location estimation

5. 실험 및 분석

실험에서 사용한 MCU는 Arm의 Cortex-m4이며 IMU는 EBIMU-9DOFV3 이다. 벽면 이동 로봇의 직선이동은 지상 이동 로봇과 다르게 벽면이동로봇은 중력 ,로봇의 무게중심, 벽면의 굴곡짐, 모터의 오차 및 틀어짐 등이 다르게 작용하여 일정한 방향으로의 직선 이동이 힘들다. [Fig.2]와 같은 제어기를 구성한 후 로봇의 Yaw값을 측정하면 [Fig.6]와 같은 결과를 얻을 수 있다. 목표 Yaw값에 명령추종을 하며 응답시간, 정상상태 오차, 최대 초과가 개선되었다.

[Fig.6]는 3. 주행방향 제어 에서 제시한 방법으로 Roll에 대해 PID제어를 진행한 후 Roll의 응답특성을 STMStudio에서 측정한 사진이다.



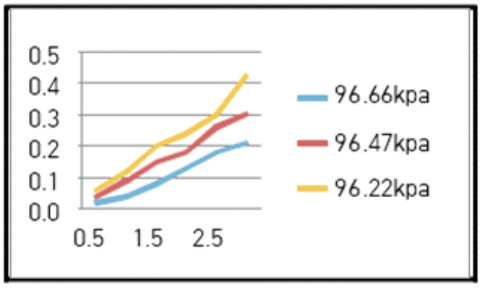
[Fig.6] Response properties

식 (5)을 이용하여 위치를 3.0m까지 이동하고 0.5m마다 측정 Chamber내부에 기압 변화에 따른 이동거리 오차를 측정 하였다. Chamber내부의 기압은 대기압센서 bmp180으로 측정 하였으며 Chamber의 반지름은 80mm 바퀴의 반지름이 45mm 이다. BLDC모터의 PWM을 조절하여 Chamber내의 기압을 조절하였다.

Actual travel distance	Travel distance measured at atmospheric pressure 96.66kpa	Travel distance measured at atmospheric pressure 96.47kpa	Travel distance measured at atmospheric pressure 96.22kpa
0.5m	0.52m	0.54m	0.56m
1.0m	1.04m	1.09m	1.12m
1.5m	1.58m	1.65m	1.70m
2.0m	2.13m	2.18m	2.24m
2.5m	2.68m	2.76m	2.8m
3.0m	3.21m	3.30m	3.42m

[Table.2] Chamber내부의 기압에 따른 이동거리 변화

실험결과, 오차는[Fig.7]와 같이 Chamber내부의 기압이 감소함에 따라 선형에 가깝게 누적된다. Chamber내부의 기압이 1kpa감소할 때 마다 1m 이동시 약 0.159m 오차가 누적되었다.



[Fig.7] 기압에 따른 Distance - Error Graph

press는 bmp180에서 측정한 현재Chamber내부의 기압이고, D_n은식 (5)의 값이다. 이동 거리를 식 (7)으로 오차를 최소화 하였다.

$$Distance = \frac{D_n}{100} + [(\frac{96660 - press}{1000}) \times 0.159 \times \frac{D_n}{100}] \qquad (7)$$

[Table.3]은 45mm인 바퀴를 장착하고 Chamber내부의 기압이 96.55kpa일 때 (7)을 이용하여 위치를 3.0m까지 이동하고 0.5m마다 측정 하였다.

Actual Travel Distance	Travel distance measured at 96.55kpa atmospheric pressure
0.5m	0.52m
1.0m	1.04m
1.5m	1.59m
2.0m	2.15m
2.5m	2.70m
3.0m	3.24m

[Table.3] 기압 96.55kpa에서 측정 된 이동 거리 결과

식 (7)을 사용함으로 Chamber내부에 기압 변화에 따른 이동거리 오차가 감소하였다.

5. 결론 및 향후 연구

실험을 통해, 벽면 이동 로봇의 Yaw값에 대해 PID제어를 진행 하여 벽면 이동 및 정밀한 이동방향 제어가 가능하다. 벽면 이동 로봇의 목표Yaw값에 명령추종을 하며 응답시간, 정상상태 오차, 최대초과가 개선되었다. 그로 인해 벽면에서 이동 및 정밀한 이동방향 제어가 가능하였다. Chamber내부의 기압에 따른 이동 거리 오차를 분석하고 식 (7)을 적용하여 이동 거리 오차를 감소시키고 보다 정확한 균열위치를 추정 할 수 있다. 그러나 바퀴의 미끄러짐 및 지형의 한계 등에 의해 오차가 누적되었다. 향후 균열의 위치를 더욱 정교하게 추정 하는 기법을 연구하며 IMU와 홀센서만을 이용하는 것이 아니라 WiFi의 신호를 이용한 기법[6]등 여러 기법을 추가적으로 연구할 것이다.

참고문헌

[1] City-Climber: A New Generation Wall-climbing Robots Jizhong Xiao and Ali Sadegh The City College, City University of New York USA

[2] Design and Control of Wall Climbing RobotUsing Impeller,Ig Mo Kool, Young Kouk Song, Hyungpil Moo Sun Kyu Park, Hyouk Ryeol Choi, Sungkyunkwan University

[3] Sang-Hoon Kim, Dong Sang Yoo, "Intelligent Embedded robot for Warehouse Inspection",Korean Society For Computer Game,p.131-135, Vol.26, No.1,30 March(2013)

[4] Sang-Hoon Kim, Young-Sik Jeong, "Mobile image sensors for object detection using color segmentation", Cluster Computing (DOI 10.1007 /s10586-013-0287-2), Springer, 2013.06,14(On line publish)

[5] Hyun Nam-gung, Il-Kwon Lim, Jae-Kwang Lee, "Location Estimation Method of Positioning System utilizing the iBeacon", *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, Vol.19, No.4, pp.925-932, 2015.

[6] Seon-Phil Kim, Namgi Kim, "Point-based Location Estimation using WiFi Signal", The Journal of Korean Institute of Information Technology, 10(1), pp.121-126 2012.

[7] Sebastian O. H. Madgwick, Andrew J. L. Harrison, Ravi Vaidyanathan, "Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm", *2011 IEEE international conference on rehabilitation robotics. IEEE*, 2011.

[8] Kim Kwan Seek, Won Chung Yeon, "Control Algorithm PMSM using Rectangular 2 Hall Sensors Compensated by Sensorless Control Method", *2011 International Conference on Electrical Machines and Systems. IEEE*, 2012.

[9] Su Bon Kim, Doo Yong Lee "An Estimation Method of Critical Oscillation Parameters for Ziegler-Nichols the 2th PID Tuning Rule ", 2013 대한기계학회 춘추학술대회