

A Study on Mobile Robot for Posture Control of Flexible Structures Using PI Algorithm

Jin-Gu Kang*

*Professor, Dept. of Electrical & Electronic Engineering, Yonam Institute of Technology, GyeongNam, Korea

[Abstract]

In this study, we propose a method for moving a device such as a flexible air sculpture while stably maintaining the user's desired posture. To accomplish this, a robot system with a structure of a mobile robot capable of running according to a given trajectory was studied by applying the PI algorithm and horizontal maintenance posture control using IMU. The air sculptures used in this study often use thin strings in a fixed posture. Another method is to put a load on the center of gravity to maintain the posture, and it is a system with flexibility because it uses air pressure. It is expected that these structures can achieve various results by combining flexible structures and mobile robots through the convergence process of digital sensor technology. In this study, posture control was performed by fusion of the driving technology of AGV(Automatic Guided Vehicle), a field of robot, and technologies applying various sensors. For verification, the given performance evaluation was performed through an accredited certification test, and its validity was verified through an experiment.

▶ **Key words:** Air Sculpture, Sensor Fusion, PI Algorithm, Posture Control, AGV

[요 약]

본 연구에서는 유연성을 가지는 공기 조형물과 같은 기구물이 사용자가 원하는 자세를 안정적으로 유지하며 이동하기 위한 방안을 제안한다. 이를 수행하기 위해 IMU를 이용한 수평 유지 자세 제어와 PI 알고리즘을 적용하여 주어진 궤적에 따라 주행이 가능한 이동로봇의 구조를 가지는 로봇 시스템을 연구하였다. 본 연구에서 사용된 공기 조형물은 고정된 자세로 얇은 끈을 이용하는 경우가 많다. 다른 방법으로는 무게 중심부에 하중을 실어 자세를 유지하며 공기의 압력을 사용하므로 유연성을 가지는 시스템이다. 이러한 구조물은 디지털 센서 기술의 융합과정을 통해 유연한 형태의 구조물과 이동로봇의 결합으로 다양한 성과를 얻을 수 있을 것으로 기대한다. 본 연구는 로봇의 한 분야인 AGV(무인 반송차)의 주행 기술과 다양한 센서를 응용한 기술들을 융합하여 자세제어를 수행하였다. 검증은 공인인증시험을 통해 주어진 성능 평가를 수행하였으며 실험을 통해 그 타당성을 검증하였다.

▶ **주제어:** 공기 조형물, 센서 융합, PI알고리즘, 자세 제어, AGV

-
- First Author: Jin-Gu Kang, Corresponding Author: Jin-Gu Kang
 - *Jin-Gu Kang (jgukang@yc.ac.kr), Dept. of Electrical & Electronic Engineering, Yonam Institute of Technology
 - Received: 2021. 12. 20, Revised: 2022. 02. 07, Accepted: 2022. 02. 07.

I. Introduction

광고에 대한 관심이 증가되면서 센서, 로봇 기술의 융합을 바탕으로 공기 조형물 시장에서는 극적인 퍼포먼스 연출 효과를 기대하기 위해 디지털 기술의 융합을 필요로 한다. 유연성을 가지는 공기 조형물은 공기를 배출하면 부피가 크게 줄어든다. 그러나 대부분 공기 조형물의 단점으로는 고정된 자세로 설치되어 있으며 무게 중심부에 하중을 실어 자세를 유지한다. 또한 공기의 압력을 사용하므로 유연성을 가지면서도 고정된 구조를 가지는 시스템이 대부분을 차지하고 있다. 이에 본 연구에서는 유연한 구조물인 공기 조형물과 이동로봇의 결합 연구하였다. 그러나 로봇의 발전에도 불구하고 실제 산업 현장에서는 시스템의 비선형성, 포화도, 히스테리시스등과 같은 많은 조건들을 포함하고 있다. 또한 환경의 변화로 제어의 어려움은 시스템의 작용점과 안정도, 효율성을 높이는데 많은 연구가 진행되고 있다[1]. 본 연구는 단순히 고정된 형태이면서도 유연성을 가지는 공기 구조물과 같이 제작되는 형태와 무관하게 유연성을 가지는 구조물이라도 사용자가 원하는 자세를 스스로 안정적으로 유지하며 이동하기 위한 방안으로 PI 알고리즘을 적용한 수평 유지 자세 제어기술과 주어진 궤적에 따라 주행이 가능한 이동로봇의 구조를 가지는 주행 로봇 시스템을 연구하였다. 기존의 PI 알고리즘 관련 연구는 일반적으로 사용되는 PID 제어 방법과 파라미터 변수 하나가 줄어들므로 파라미터 변화에 대한 빠른 대응 등의 장점과 우수한 제어 응답을 얻을 수 있으므로 액추에이터 등의 제어를 구현하는 산업현장에서 널리 사용되고 있다. 또한 제작이 쉽고 제어 효과도 우수하기 때문에 산업체에서 많이 사용되며 유전자 알고리즘 등을 이용한 파라미터 변화에 대한 최적화의 연구가 진행되고 있다[2]. 현재 기울기 정보를 이용하여 수평 자세를 유지하며 주행을 할 수 있는 모바일 역 진자 연구는 이전에 많은 연구가 진행되어 왔으며 소개된 바가 있다[1-3]. 본 연구에서는 이동 로봇의 주행 기술과 각종 센서 융합 기술을 응용한 조형물의 자세를 수행하기 위한 로봇을 연구하였다. 이동로봇을 안정적으로 제어하기 위하여 모터 구동은 PI 알고리즘을 이용하였으며 각도를 얻기 위하여 9DOF-IMU를 사용하여 시스템을 설계, 제작하고 실험을 통하여 그 효율성을 검증하였다.

II. System Configuration

1. Configuration

실험을 위해 AGV와 유사하게 상판에 공기 조형물을 결합하여 주행을 할 수 있는 전용 플랫폼을 제작하였다. 기존의 AGV와 차이점은 전체 플랫폼의 높이를 최대한 낮게 구성하여 공기 조형물의 사용목적인 광고 및 극적 퍼포먼스의 효과를 더욱 높일 수 있도록 공기 조형물 속으로 들어가게 제작하며 플랫폼의 노출을 최대한 제한하였다. 그림 1과 같이 CAD로 이동로봇을 구성하였다.

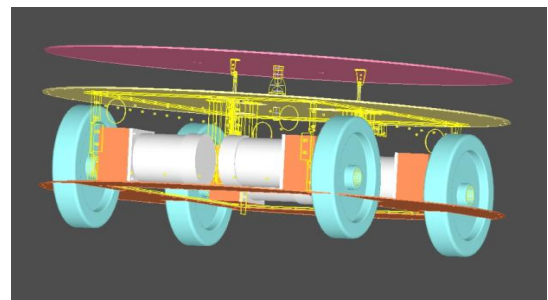


Fig. 1. Mobile Robot Configuration

안정된 주행을 위해 플랫폼의 상부 구조물의 센서 장치로부터 공기 조형물의 무게 중심의 변화와 자세 정보를 분석하여 주행을 수행하였다. 주행 모드는 3가지로 구분하여 자율 주행, 라인 주행, 수동 주행모드로 구분하여 주행하도록 구성하였다. 플랫폼의 하부구조물인 이동 매니플레이터 본체에 4 방향으로 센서 부착을 위한 부하지지 시설이 설치된다. 8개의 초음파 센서와 8개의 근거리 적외선은 센서는 플랫폼 자체에 설치된 부하지지 시설에 부착한다. 4방향의 센서 부착을 위한 부하 지지시설로 구성하였으며 중앙에 유니버설 조인트를 이용하여 상부 구조물이 안정된 자세를 유지할 수 있도록 구성하였으며 MCU는 dsPIC30F4013을 사용하였다. 그림 2는 로봇의 상부구조를 나타내었다.

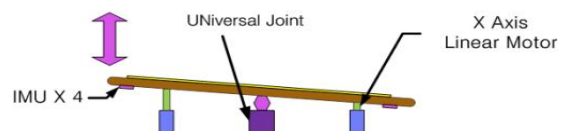


Fig. 2. Robot Superstructure

플랫폼의 하부구조물인 이동로봇 본체는 모터 및 제어를 설치하였다. 그림 3은 제작된 이동로봇을 나타내었다.



Fig. 3. Mobile Robot system

8개의 초음파 센서와 8개의 근거리 적외선은 센서는 플랫폼 자체에 설치된 지지 시설에 부착하였다.

이러한 형태는 제작되는 조형물의 크기와 형태에 제약을 받지 않고 플랫폼과 결합할 수 있다. 공기 조형물과 결합되었을 때 속도와 방향을 제어할 수 있으며 상황에 따른 정보를 제공하여 안정된 주행이 가능하며 충돌 방지 및 장애물 회피, 비상 정지 시 공기 조형물의 자세 불안정에 의한 2차 사고를 방지하므로 전체 시스템에 안정성을 줄 수 있도록 설계-제작하였다. 그림 4는 공기 조형물과 결합된 전체 시스템이다.



Fig. 4. Combination of Air Structures

2. Kinematics of mobile robots

독립적인 구동을 위하여 설계된 이동 로봇의 하부구조는 기구학을 해석을 통하여 구동부가 제어되어야 한다[4]. 그림 5는 이동로봇의 하위 구조인 로봇의 기구학적 모델링 및 좌표계를 나타내었다. 그림 5와 같이 좌표계를 설정하고 2차원 평면으로 구성된 전역 좌표계에서 속도 기구학을 통해 로봇의 상태를 위치와 방향을 갖는 벡터 $p = [x_m \ y_m \ \theta_m]^T$ 로 표현할 수 있다[5].

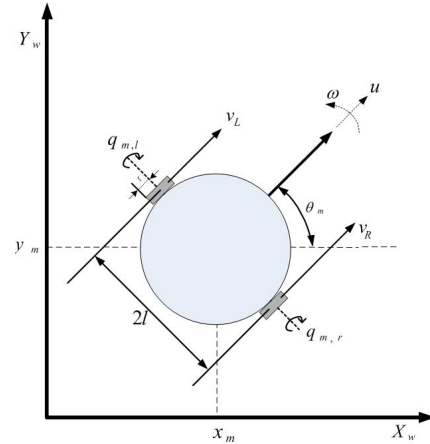


Fig. 5. Kinematics of mobile robot

여기서,

X_W, Y_W : Cartesian 좌표계에서의 world frame

x_m, y_m : Cartesian 좌표계에서의 로봇의 중심점의 좌표

l : 로봇 중심에서 바퀴 축 의 거리

v_R, v_L : 로봇의 오른쪽 및 왼쪽 바퀴의 선형속도

u : 로봇 중심에서의 선형속도

ω : 로봇 중심에서의 각속도

순수 구름 조건은 바퀴와 접촉면 사이의 순간적 이동방향으로의 상대속도가 0이라는 조건이므로 오른쪽 바퀴에 대하여 식 (1)과 같이 나타나고[6]

$$\begin{aligned} & -\cos(\theta_m)\dot{x}_m - \sin(\theta_m)\dot{y}_m \\ & -l\dot{\theta}_m + r\dot{q}_{m,r} = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

왼쪽 바퀴에 대하여 식 (2)와 같이 나타난다.

$$\begin{aligned} & -\cos(\theta_m)\dot{x}_m - \sin(\theta_m)\dot{y}_m \\ & -l\dot{\theta}_m + r\dot{q}_{m,l} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

식 (1) ~ 식 (2)에 의해 직교평면에서의 로봇의 속도와 각속도는 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \frac{R}{2}(\dot{q}_{m,r} + \dot{q}_{m,l})\cos\theta_m \\ \dot{y} &= \frac{R}{2}(\dot{q}_{m,r} + \dot{q}_{m,l})\sin\theta_m \\ \dot{\theta}_m &= \frac{R}{2l}(\dot{q}_{m,r} - \dot{q}_{m,l}) \end{aligned} \quad (3)$$

또한 로봇을 제어하는데 있어서의 두 제어입력인 선형 속도 u 와 각속도 ω 로 달리 표현하면, 식(4)와 같다.

$$u = \frac{1}{2}(v_R + v_L)$$

$$\omega = \frac{1}{2l}(v_R - v_L) \tag{4}$$

이러한 기구학 관계로부터 로봇은 매 제어 주기마다 위치벡터를 계산하며, u 및 ω 는 각 바퀴의 엔코더 신호로부터 계산된다[7].

III. PI Algorithm

본 연구에서 사용된 시스템 알고리즘은 응답속도를 높이기 위해 PI 알고리즘을 사용하였다. 표준형 PI 제어기는 식 5과 같이 표현된다[8].

$$m(t) = K \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \right] \tag{5}$$

$$= K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau$$

여기서, $e(t)$ 는 오차 신호다.

PI 알고리즘에는 구동 모터의 출력을 제어하기 위해서 미분항을 제외한 비례, 적분 궤환을 이용하였다. 2개의 비례, 적분 Gain 상수는 빠른 시스템 응답을 만드는데 중요하며 응답을 빠르게 하고 안정성을 높인다. 제어 알고리즘을 향상시키기 위해서는 2가지의 조정이 필요하다. 첫째는 상당히 큰 적분 상수에 의하여 오랜 시간 후에 큰 오차를 일으키는 불안정성을 막기 위하여 적분 항의 크기를 적당한 값으로 고정시키는 것이고 둘째는 시스템 안정성을 높이기 위해 오차의 부호가 바뀔 때 적분 항을 제거하는 것이다[8]. 디지털 제어를 위해 이산 시간에서의 PI 제어를 나타내며 식 6을 나타내기 위해 식을 $t = kT_s$, $t = (k-1)T_s$ 에서 이산시간으로 등가 변환하면 식 6과 같이 표현할 수 있다.

$$m(k) = K \left\{ e(k) + \frac{1}{T_i} \int_0^{kT_s} e(\tau) d\tau \right\} \tag{6}$$

$$m(k-1) = K \left\{ e(k) + \frac{1}{T_i} \int_0^{(k-1)T_s} e(\tau) d\tau \right\}$$

여기서, T_s 는 샘플링 주기이다. 따라서 이산시간에서의 PI 제어는 식 7과 같다.

$$\Delta m(k) = K_p \Delta e(k) + K_i e(k) \tag{7}$$

여기서 $K_p = K$, $K_i = K \frac{T_s}{T_i}$ 이다.

수식이 처리되는 과정은 주어진 조건에서 목적으로 하는 값을 최대 또는 최소화하는 설계 변수를 구하는 것이다. 따라서 시스템에 대한 목적 함수인 성능 지수로 시스템 오차 e 를 최소화하는 설계 변수인 PI 제어기의 K_p , K_i 를 결정하였다. 또한 식 8과 같이 성능 지수는 제곱 오차 적분 값인 시스템 오차 값을 제공한 후 전 시간에 대한 적분으로 처리하였다.

$$\text{최소화 } P. \quad I = \int_0^\infty e^2(t) dt \tag{8}$$

IV. Experiment and Evaluation

본 연구에서 제안한 유연한 구조물의 안정된 주행을 위하여 4가지의 성능 평가를 설정하였으며 그림 6은 공인인증시험 기관 RAPA에서 성능 평가를 시험한 성적서이며 모두 적합한 결과를 얻었다.



Fig. 6. Test Report

시험 내용은 진동시험과, 센서 입출력 응답시간, 정밀도, 최대 주행 경사도를 측정하였다. 성능 평가의 환경 및 평가요소에서 진동시험은 진동 가속도가 20m/s² 주파수

10~150Hz, 스위프 사이클 10회로 X, Y, Z 축으로 진동시험 진행 후 기계적 손상이 없어야 하고 정상 구동이 되는 시험을 수행하였다. 최대 경사도의 시험은 10° 경사면에서 플랫폼이 정상 동작하는지를 확인하였다. 또한 센서 입출력 응답시간은 제어 루프 수행과 구동 액추에이터 입력에 관한 신호의 주기를 측정하였으며 0.2sec 보다 작음을 확인하였다. 성능지표 설정은 산업 현장에서 필요한 로봇의 성능 목표로서 실내 또는 실외 동작 시 시스템 진동과 입출력 응답시간, 센서의 정밀성은 시스템의 안정성과 신뢰성에 중요한 요소로 작용한다. 또한 산업 현장은 순수 구름조건이 아니므로 일정 이상의 경사도를 주행 가능한 로봇을 제작할 필요성이 있었다. PI알고리즘을 이용한 이동 로봇의 수평유지와 자세제어의 성능을 검증하기 위하여 실험을 수행하였다. 이동로봇의 하부구조 구동축 제어기에서 좌, 우 모터에 장착된 엔코더 값을 통해 이동거리와 속도를 계산했으며 PI 제어기의 샘플링 시간은 0.2 msec 로 PWM 제어 입력을 생성하여 H-Bridge 모터 드라이브에 인가하여 양방향 제어를 수행하였다. 그림 7은 이동로봇이 주행 시 자세 변화를 주었을 때를 나타낸다.

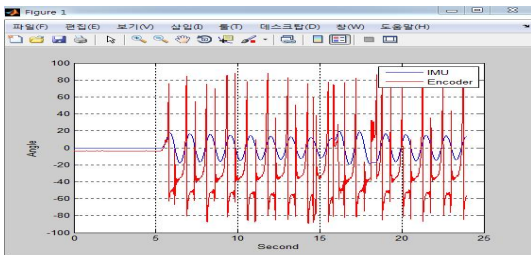


Fig. 7. Changes in Posture of Mobile Robot

자세의 변화에 대한 의한 출력과 응답을 실험을 통하여 확인 하였다. PI Gain은 P=5 I=0.3로 실험을 통해 값을 결정하였다.

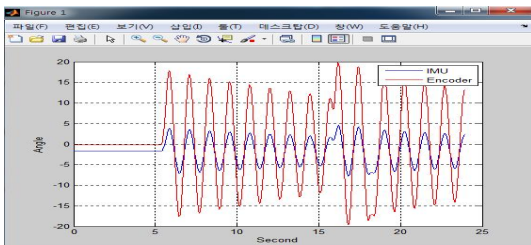


Fig. 8. Response to Changes in Posture

그림 8은 주행 중 자세의 변화를 주었을 경우 PI 알고리즘을 통과한 응답 결과를 나타내었으며 비교적 안정된 결과를 얻을 수 있었다. IMU의 데이터는 가속도 값의 변화가 미세하며 자이로 출력값의 누적오차가 존재한다.

V. Conclusions

본 연구에서는 광고를 목적으로 하는 유연한 공기 조형물의 안정된 주행을 위해 IMU를 이용한 자세제어와 응답 특성을 높이기 위해 PI 알고리즘을 이용하여 로봇의 자세제어와 주행을 연구하였다. 이는 공기 조형물 시장뿐 아니라 유연성을 가지는 시스템을 사용자가 원하는 자세를 유지하며 이동할 수 있는 다른 분야에서도 적용이 가능하다 판단된다. 본 연구에서 사용된 9DOF-IMU는 자이로와 가속도 센서가 결합되어 오일러 각을 추출할 수 있는 센서로서 비교적 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 실험에서 오랜 시간 동안 시스템을 동작시켰을 경우 미세한 오차가 증가함을 보였다. 이것은 자이로 센서의 오차 누적 과정의 오차라 판단되어 지정된 시간 이후 버퍼를 초기화를 반복하여 자세를 교정하였다. 본 연구에서는 유연한 구조물의 자세제어와 주행을 위해 이동로봇에 PI 알고리즘과 IMU를 적용하여 제작과 실험을 해 보았으며 이는 안정적 주행을 위한 다양한 분야에 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

REFERENCES

- [1] Jin Gu Kang, "A Study on Pose Control for 2 wheel Robot using ARS," Journal of Korea Society of Digital Industry and Information Management, Vol. 9, No. 1, pp. 73-78, 2013.
- [2] Minhwan Kim, Sungmin Byun, "A Guided Tracing Technique on a Virtual Tracing Wheel for Effective Navigation of Vision-based AGVs," Journal of the Korea Multimedia Society, Vol. 19, No. 3, pp. 539-547, 2016.
- [3] O.K. Choi, J. Kim, and J. Lee, "BIBO stability analysis of TSK fuzzy PI/PD control systems," Intelligent Automation and Soft Computing, Vol. 21, No. 4, pp. 645-658, Feb 2015.
- [4] H. H. Tack, S. G. Kwon, "Driving Control of Automated Guided Vehicle Using Centroid of Gravity Method," Journal of the Korea Industrial Information Systems Research, Vol. 19, No. 2, pp. 59-66, Apr 2014.
- [5] R. O. Ambrose, R. T. Savely, S. M. Goza, P. Strawser, M. A. Diftler, I. Spain, and N. Radford, "Mobile Manipulation using NASA's Robonaut," IEEEICRA, pp. 2104-2109, 2004.
- [6] Ju-Won, Byeong-Ro Lee, "Design of Automatic Guided Vehicle Controller with Built-in Programmable Logic Controller," The korea institute of convergence signal processing, Vol. 20, No. 3, pp. 118 ~ 124, 2019.
- [7] A. Kumar, "Development of an automated guided vehicles in industrial environment," International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, Vol. 3, No. 1, pp. 377-391,

2014.

- [8] Jongmin Cheon, Jinwook Kim, Hongju Kim, Youngkiu Choi and Maolin Jin, "A Fuzzy PI Controller for Pitch Control of Wind Turbine," Journal of Drive and Control, Vol. 15, No. 1, pp. 28-37, 2018.

Authors



Jin-Gu Kang received the M.S. and Ph.D. degrees in Electronic Engineering and Engineering from Busan University, Korea, in 1998, 2001. Dr. Kang joined the faculty of the Department of Electrical & Electronic

Engineering at Yonam Institute of Technolog, GyeongNam, Korea, in 2020. He is currently a Professor in the Department of Electrical & Electronic Engineering at Yonam Institute of Technolog. He is interested in mobile robot, posture control, and A.I.