

비평탄 지형 극복을 위한 로봇의 최적 평형 유지 알고리즘 연구

선지호, 김민규, 정세진, 김상훈
 한경국립대학교 ICT로봇공학전공
 e-mail : hoyaseon@gmail.com

A Study on Optimal Balance Control Algorithms of Robot for Overcoming non-flat Terrain

Ji-Ho Seon, Se-Jin Jung, Min-kyu kim, Sang-Hoon Kim
 Department of ICT & Robot Engineering, Hankyong National University

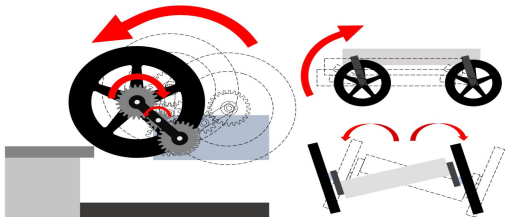
요 약

본 논문에서는 단차 극복, 주행 자세 변경, 몸체 평형 유지가 동시에 가능한 편심 메커니즘을 제안하였으며, 이 메커니즘을 채용한 로봇의 평형 제어 방식을 개선하고 관련 성능을 평가하였다. 제안한 방식을 기존의 방식과 비교 실험하여 처리 시간, 메모리 사용량 등 주요 성능에 있어서의 변화와 효율성을 검토하였다. 이를 통해 로봇이 채용한 제한된 임베디드 S/W 환경에서도 실시간으로 몸체의 기울기 보정이 효율적으로 이루어짐을 확인하였으며, 편심 메커니즘을 채용한 로봇에 적합한 알고리즘임을 보여주었다

키워드 : 편심 메커니즘, PID 제어, 퍼지 추론

1. 서론

실외 이동 로봇 개발 및 연구는 현재까지 활발히 진행되고 있다. 로봇 시범 운영과 인프라 구축 사업 추진, 운행안전인증[1]을 통한 보도 운행 등으로, 기존 실내에 국한되어 있던 로봇이 점차 활동 영역을 실외로 넓히고 있는 추세이다.



(그림 1) 편심 메커니즘 이용 단차 극복, 기울기 조절

본 연구에서는 실외 이동 로봇의 상용화를 위해 계단과 같은 단차를 극복하고 비평탄 지형에서 안정적으로 주행하기 위한 편심 메커니즘이라는 아이디어를 제안하였다. 편심 메커니즘(그림 1)은 편심 축과 유성 기어 구조에서 착안한 설계로 바퀴 로봇의 기동성, 다리 로봇의 조작 정밀성, 기어를 이용한 더 큰 토크 생성을 바탕으로 비평탄 지형에 최적화된 성능을 제공할 수 있도록 제작하였다. 본 논문에서는 편심 메커니즘 구조로 최적의 성능을 발휘할 수 있는 평형 유지 알고리즘 선정을 목표로 한다.

2. 실시간 몸체 기울기 보정 원리

$$R_{roll} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_{roll}) & \sin(\theta_{roll}) \\ 0 & -\sin(\theta_{roll}) & \cos(\theta_{roll}) \end{bmatrix} \quad R_{pitch} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{pitch}) & 0 & \sin(\theta_{pitch}) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta_{pitch}) & 0 & \cos(\theta_{pitch}) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{roll}) & \sin(\theta_{roll}) \\ -\sin(\theta_{roll}) & \cos(\theta_{roll}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y \\ z \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} x'' \\ z'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{pitch}) & \sin(\theta_{pitch}) \\ -\sin(\theta_{pitch}) & \cos(\theta_{pitch}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix}$$

$$\text{목표 다리 높이} = z' + z''$$

(그림 2) 회전 행렬을 이용한 다리 좌표 갱신
 로봇의 폭, 길이를 이용해 각 다리 끝점을 좌표로 나타낸다. 센서 데이터로 PID 제어값을 계산하고, 회전 행렬로 변환해 몸체 기울기 변화를 표현, 현재 다리 위치 좌표를 갱신해 목표 다리 높이를 구한다.

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{\text{목표 다리 높이} - \text{바퀴 반지름}}{\text{다리 길이}} \right) \dots \dots \dots (1)$$

(그림 2)의 (수식 1)을 통해 모터 목표 각도를 구하고 몸체 기울기를 실시간으로 보정한다.

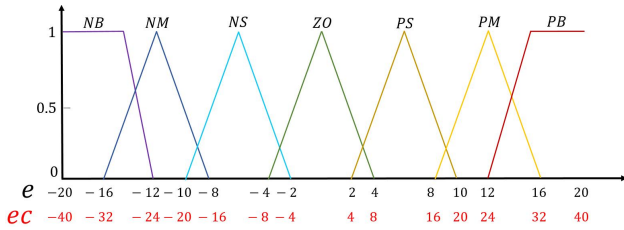
3. PID 제어, 퍼지 PID 제어 방식 비교

$$u_{roll}(t) = K_{p(roll)}e(t) + K_{i(roll)}\int_0^t e(\tau)d\tau + K_{d(roll)}\frac{de(t)}{dt}$$

$$K_{p(roll)} + \Delta K_{p(roll)} = K_{p(roll)} + \frac{\sum_{i=0}^6 \sum_{j=0}^6 form[i][j] \cdot kp[i][j]}{\sum_{i=0}^6 \sum_{j=0}^6 form[i][j]}$$

(수식 2) roll 축 PID 제어 수식 및 Kp 게인 자동 조절 수식
 (수식 2)의 $form[i][j]$ 는 퍼지화시 소속도 값, $kp[i][j]$ 는 퍼지 규칙에 따른 $K_{p(roll)}$ 의 조정값이다.
 기본 PID 제어는 IMU 센서에서 pitch, roll 축 각각

에 대한 에러 e , 에러의 변화량 ec 를 기반으로 제어 신호를 생성한다. 이를 이용해 실시간으로 기울기를 보정하는 방식[3]이다.



(그림 3) 입력값 e , ec 의 퍼지 추론 소속도 함수[4]
퍼지 PID 제어는 PID 게인의 자동 조정을 수행한다. 먼저 e , ec 를 입력으로 받아 7개의 퍼지 집합에 대한 소속도(그림 3)를 계산하고, AND 연산을 통해 종합적인 상태를 평가한다. 규칙 테이블에 따라 탈퍼지화하여 게인을 주기적으로 보정한다.

4. 비교 실험 및 처리 시간, 메모리 사용량 분석



(그림 4) (상) PID 제어 (하) 퍼지 PID 제어 초기 PID 그래프



(그림 5) (상) PID 제어 (하) 퍼지 PID 제어 시간 경과 후 PID 그래프

기본 PID 제어는 미리 수동으로 PID 게인을 조정하였고, 퍼지 PID 제어는 pitch와 roll 축 총 6개의 PID 게인(각각 1.0, 0.01, 0.1)으로 시작하여 자동으로 조정한다. 각각 경사 기울기 변화에 따른 성능, 처리 시간, 메모리 사용량을 확인하였다. (그림 4, 5)에서 기본 PID 제어는 약간의 진동이 있으나 시간 경과에 관계없이 준수한 성능을 보였다. 퍼지 PID

제어의 경우 게인 튜닝이 이루어지지 않은 초기에는 진동이 심하나 시간 경과 후 기본 PID 제어 방식과 비슷한 성능을 보였다.

time : 0.89855 ms	time : 0.99701 ms
time : 0.89855 ms	time : 0.89875 ms
time : 0.89888 ms	time : 0.99657 ms
time : 0.89887 ms	time : 0.89908 ms
time : 0.89888 ms	time : 0.99693 ms
time : 0.89888 ms	time : 0.90061 ms

(a) PID 제어

(b) 퍼지 PID 제어

(그림 6) 기울기 보정 연산 처리 시간 측정 비교

$$\text{처리 시간} = \frac{\text{사이클 수} \times 1000}{\text{CPU 클럭 주파수 (86 Mhz)}} \dots\dots\dots (2)$$

처리 시간은 사이클 수를 측정한 후 (수식 2)를 이용해 구한다. 기본 PID 제어의 경우 처리 시간은 0.896ms로 측정된 것을 확인했다. 퍼지 PID 제어의 경우 평형 유지일 때 0.896ms로 동일하나 기울기 변화시 0.997ms 까지 처리 시간이 증가했다. 스택 메모리 사용량의 경우 기본 PID 제어 함수가 40 Byte, 퍼지 PID 제어 함수가 344 Byte 차지했다.

5. 결론 및 향후 연구

퍼지 PID 제어 방식은 처리 시간이 1.1배, 메모리 사용량은 약 8배 정도 증가했다. 기존 PID 제어는 다수의 파라미터를 수동 조정해야 하기에 많은 시간과 노력이 요구되었으나, 퍼지 PID 제어 방식은 자동 조정으로 안정적인 동작 성능을 제공하였고, 처리 시간, 메모리 사용량 증가를 상쇄할 만큼의 효율성을 보여주었다. 퍼지 PID 제어 방식의 적용은 수동 조정 과정을 생략해서 효율적이거나, 실제 기능으로 탑재하기에 개선이 필요하다. 향후 연구에서는 퍼지 PID 제어의 개선을 진행하며, RTOS 환경에서 장시간 주행 성능 검증, 멀티태스킹시 동작 확인을 하여 향상된 제어 성능을 달성할 계획이다.

-본 논문은 과학기술정보통신부
대학디지털교육역량강화사업의 지원을 통해 수행한
ICT멘토링 프로젝트 결과물입니다.-

참고문헌

- [1] 산업통상자원부, "고시 제2023-123호: [실외이동로봇 운행안전인증 절차 및 기준 등에 관한 고시]," 산업통상자원부, 2023/11/17, 접근: 2024년 9월 10일, <https://www.motie.go.kr/kor/article/ATCL0c554f816/64488/view>.
- [2] 정세진, 김민규, 선지호, 박명숙, 김상훈. (2023). 지형 극복을 위한 바퀴구동형 자율주행 소형 로봇의 효율적 기구설계에 관한 연구. 한국정보처리학회 학술대회논문집, 30(2), 755-756.
- [3] Nie, Zhen, Zhao, Huailin, Sun, Lu, Zhong, Xiongfeng, "Self-balancing Car based on Adaptive Fuzzy PID Control," International Conference on Artificial Life and Robotics, 2020, pp. 599-604.
- [4] AL-NUSSAIRI, Mohammed, Al-Majidi, Sadeq, Jber Mshkil, Ali, Dakhil, Adel, Abbod, Maysam, Al-raweshidy, Hamed, "Design of a Two-Area Automatic Generation Control Using a Single Input Fuzzy Gain Scheduling PID Controller," 15th International Conference on Industrial Engineering and Systems, 2022, pp. 13.