

# 곡관에서 관내 주행 로봇의 항법 제어 Navigation for In-pipe Robot in a Curved Pipe

\*박정완<sup>1</sup>, #양현석<sup>2</sup>

\*J. W. Park<sup>1</sup>, #H. S. Yang (hsyang@yonsei.ac.kr)<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 연세대학교 기계공학과, <sup>2</sup> 연세대학교 기계공학과

Key words : Navigation, Curved Pipe, In-pipe robot,

## 1. 서론

현대 사회에서 파이프 시스템은 일상 생활과 경제 활동을 유지하기 위한 필수적인 기반 시설이며 요체를 수송하기 위해 가장 오랫동안 사용된 효율적인 시설이다. 이러한 파이프 시스템의 내부 상태에 따라 수송되는 유체의 품질은 큰 영향을 받을 수 있기 때문에 파이프 내부의 상태를 항상 검사, 유지 및 보수가 매우 중요한 이슈가 되고 있다. 그러나 대부분의 파이프들은 지하에 매설되어 있어 외부에서 확인이 어렵고, 사람이 내부로 접근하기에는 너무 협소하기 때문에 육안을 통해 검사하고 보수하기에 어려움이 있다. 이러한 이유들 때문에 그 동안 파이프의 유지는 일정기간 이상 된 파이프를 교체하는 방법으로 이루어져 왔다. 이런 방법은 유체 수송을 일시적으로 중단해야 하며 도로를 파헤치는 등 많은 비용이 드는 단점이 있는데, 이런 단점을 해결할 수 있는 방법으로 로봇이 대두되어 왔다. 로봇을 이용한 파이프의 내부 검사 시스템을 개발에서 가장 중요한 관내 주행 로봇의 개발에는 해결해야 하는 문제점들이 크게 3 가지가 있다. 첫 번째로는 로봇의 크기가 있는데, 로봇의 크기는 검사하고자 하는 관의 직경과 곡관에서 최소 곡률에 따라 로봇의 길이와 크기를 정해야 한다. 두 번째 문제로는 관경 변화에 대한 적응력이다. 파이프 시스템은 다양한 직경을 가지고 있는 관들의 조합으로 이루어져 있다. 그렇기 때문에 주행 로봇은 여러 크기의 관을 주행 할 수 있어야 한다. 만약 로봇이 관의 크기에 적응할 수 없다면 로봇은 주행 중에 파이프에 끼어버리거나 파이프 벽면과의 추력을 얻을 수 없는 문제에 만날 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 여러 가지 메커니즘을 이용한 로봇들이 많이 소개되어 있다 [2]-[6]. 마지막으로 관 내부를 주행할 때의 항법 제어가 있다. 파이프 시스템은 여러 관들이 서로 연결되어 있기 때문에 주행 중 곡관을 만나게 된다. 곡관에서의 주행이 불가능 하다면 전체 파이프 시스템의 검사와 보수는 불가능하다고 할 수 있다. 이 곡관에서 주행이 가능하기 위해서는 각 구동부의 속도를 서로 다르게 해주어야 한다. 곡관에서 각 구동부의 속도를 제어하는 여러 가지 방법들이 발표되어 왔다 [5]-[10]. 하지만 이런 방법들은 영상 처리 등 복잡한 알고리즘이 필요하다. 본 논문에서는 이에 비해 간단한 제어 방법을 소개하고 시뮬레이션과 실험을 통하여 검증한다.

## 2. 선행 연구

관내 주행 로봇이 곡관에서 원활히 주행하기 위해서는 관이 구부러진 곡률에 맞추어 각 구동부의 속도를 다르게 해주어야 한다. 파이프 라인의 구부러진 곡률의 수학적 표현을 통해 각 구동부의 속도 프로파일을 결정 할 수 있다. 이러한 방법은 로봇에 대하여 상대적인 곡관의 진행 방향과 곡률을 미리 알아야 한다. 이러한 정보를 알기위해서 많은 로봇들이 CCD 카메라를 이용하여 곡관의 진행 방향을 예측하고 있다 [6]-[9]. 이 방법은 복잡한 영상 처리 알고리즘으로 인하여 고성능의 프로세서가 필요하다는 단점을 지니고 있다. 또 일정한 곡률이 아닌 경우 로봇의 주행이 비효율적이 될 수 있다는 점이 문제점이다. 다양한 곡률에 적용될 수 있는 방법으로서 각 구동부의 전력 소

모를 측정하여 이에 따라 각 구동부의 속도를 제어하는 방법이 있다 [10]. 이 방법은 여러 곡률에 대해서 대응할 수 있으며, 곡관의 진행 방향을 미리 예측 할 필요가 없다는 점이다. 그러나 각 구동부의 전력 소모를 측정하여 속도를 제어하기 위해 퍼지 제어 시스템과 같은 복잡한 제어 시스템을 사용한다는 단점을 가지고 있다. 본 논문의 저자는 곡관에서 이러한 복잡한 알고리즘을 사용하지 않고 다양한 곡률에 대응할 수 있는 직관적인 제어 방법을 제시하였다 [1]. 본 논문에서는 예전에 제시된 직관적인 제어 방법인 상태 공간 방정식을 이용하여 제어 알고리즘을 제시한다.

## 3. 제어 알고리즘

그림 1 은 실험에 사용된 관내 주행 로봇의 각 구동부의 속도를 제어 하지 않았을 때의 모습이다. 제시된 로봇은 크게 구동 트랙 모듈, 관경 변화 적응 메커니즘, 수직 항력 제어를 하는 센터 모듈로 이루어졌으며, 트랙 모듈과 관경 적응 메커니즘이 서로 회전 조인트로 연결되어 있어 관 내부의 기하학적 변화에 대해 쉽게 적응 할 수 있다. 구동 트랙 모듈과 관경 적응 메커니즘은 센터 모듈을 중심으로 120° 간격으로 총 3 세트가 조립되어 있다. 곡관에서 로봇이 속도 제어를 하지 않는다면 그림과 같이 트랙이 관 내벽을 따라 회전하게 된다. 이 회전 각도  $\theta$ 는 관경 적응 메커니즘과 트랙 모듈을 연결하는 회전 조인트에 설치된 각도 센서를 통해 알 수 있다. 각 구동부의 속도를 각기 제어하여 회전 각도  $\theta$ 를 항상 0°으로 유지한다면 곡관에서 자세의 흐트러짐 없이 주행을 할 수 있다.  $d$ 는 각 모듈의 이동 거리,  $v$ 는 이동 속도를 나타내며  $l$ 는 관경 적응 메커니즘의 길이를 나타낸다. 아래 첨자  $i$ 는 각 트랙 모듈의 번호이고  $c$ 는 센터 모듈을 나타낸다. 우리는 각 상태 변수들의 관계를 얻기 위해서 그림 2 와 같이 각 모듈의 위치를 도식적으로 표현하였다. 기구학적인 분석을 통해 얻은 상태 변화간의 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$x_i = \int_0^t v_i dt \tag{1}$$

$$x_c = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 x_i \tag{2}$$

$$\theta_i = \sin^{-1} \left( \frac{x_i - x_c}{l} \right) \tag{3}$$

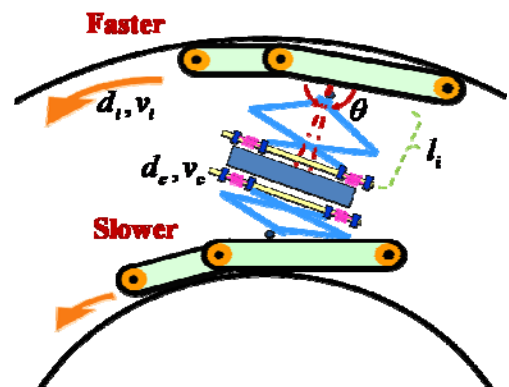


Fig. 1 The posture when an in-pipe robot passes in a curved pipe



Fig. 2 The posture when an in-pipe robot passes in a curved pipe

회전 각도  $\theta$  가 작다면 식(3)은 식(4)와 같이 선형화하여 표현할 수 있다.

$$\theta_i = \frac{x_i - x_c}{l_i} = \frac{2x_i - \sum_{j=1, \neq i}^3 x_j}{l_i} \quad (4)$$

상태 변수들의 관계식 (1)-(4)을 통하여 다음과 같이 이산 제어 시스템을 구성 할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ v_1 \\ \theta_2 \\ v_2 \\ \theta_3 \\ v_3 \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} 1 & 2T_s/3l_1 & 0 & -T_s/3l_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 2T_s/3l_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -T_s/3l_1 & 0 & -T_s/3l_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ v_1 \\ \theta_2 \\ v_2 \\ \theta_3 \\ v_3 \end{bmatrix}_k + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix}_k \quad (5)$$

상태 방정식은 식 (5)와 같이 구성되고, 모든 상태 변수가 관측 가능하다.  $u$  는 입력 값으로 각 트랙 모듈의 속도이고  $T_s$  는 샘플링 주기이며  $k$  는 현재 시간이다. 극점 배치 기법을 이용하여 전 차수 되먹임 제어 시스템을 설계하였다.

#### 4. 시뮬레이션

시뮬레이션은 로봇이 곡관에 진입하여 각 트랙 모듈이 회전하였을 때를 기준으로 진행하였다. 그림 3 은 시간에 따른 회전 각도의 변화를 보여준다. 그림 4 는 입력으로 준 각 구동 모듈의 속도이다. 시뮬레이션 결과에서 볼 수 있듯이 각 회전 각도가  $0^\circ$  으로 수렴함을 알 수 있다,

#### 5. 결론

본 논문에서 곡관 주행을 위해 단순한 제어 방법을 제시하고 이를 시뮬레이션을 통하여 검증하였다. 제시된 방

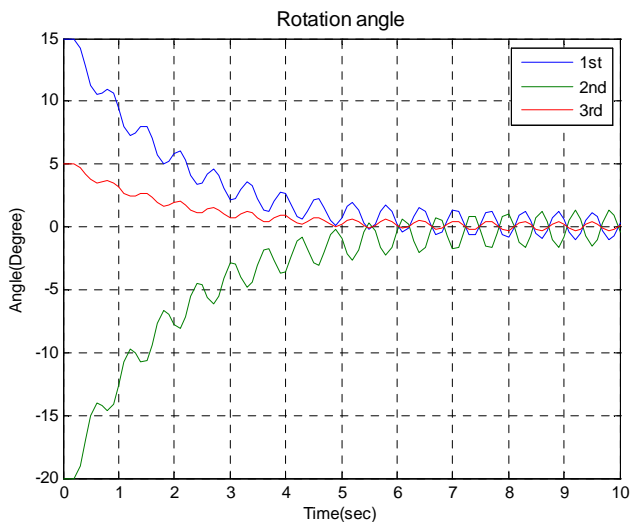


Fig. 2 Rotation angle of each track module

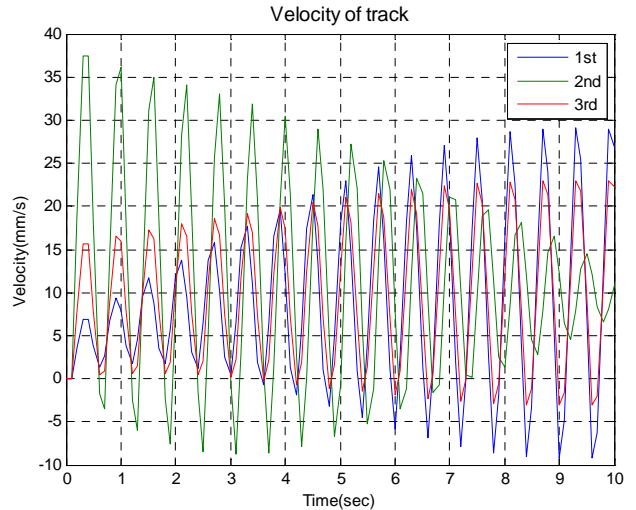


Fig. 4 Input velocities to each track module

법은 곡관을 주행하기 위해서 파이프 시스템에 대한 정보를 미리 요구하지 않으며 다양한 형태의 곡관에 대해서 적용 가능하다. 단순한 제어 방법이기 때문에 고성능의 프로세서가 필요 없다.

#### 후기

본 연구는 정부(지식경제부)의 재원으로 “산업기술개발(1031484)”의 지원을 받아 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. Jungwan Park, Taehyun Kim, Hyunseok Yang, “Development of an active adaptive in-pipe robot”, IEEE Int. Conf. Mechatronics, 2009.
2. Tokuji Okada, and Tsuyohi Snemori, “MOGRER: A vehicle study and realization for in-pipe inspection task”, IEEE J. robotics and Automation, Vol. 3, 573-582, 1987.
3. Majid Mohammady Moghddam, and Mohammad Reza Arbab Tafti, “Design, modeling and prototyping of a pipe robot”, 22<sup>nd</sup> Int. Symp. Autonomous and Robotics in Construction, 2005.
4. O. Tatar, D. Mandru, I. Ardelean, “Development of mobile minirobots for in pipe inspection tasks”, MECHANIKA, Nr 6(68), 60-64, 2007.
5. Chen Jun, ZongQuan Deng, ShenYuan Jiang, “Study of Locomotion Control Characteristics for Six Wheels Driven In-pipe Robot”, IEEE Int. Conf. Robotics and Biomimetics, 119-124, 2004.
6. Se-gon Roh and Hyouk Ryeol Choi, “Differential-Drive In-pipe Robot for Moving Inside Urban Gas Pipelines”, IEEE Transactions on Robotics, vol. 21, 1-17, 2005.
7. M. Muramatsu, N. Namiki, R. koyama, Y. Suga, “Autonomous Mobile Robot in pipe for Piping Operations”, IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and System, 2166-2171, 2000.
8. Fengping Xu, Jun Zhao, Zongquan Deng, “Research Influence Factor on Pipeline Robot Driving Force in Elbow of Pipe”, IEEE Int. Conf. Robotics and Biomimetics, 1624-1628, 2007.
9. Zhang Xiaohua and Chen Hongjun, “Visual Servo Technique of Autonomous Mobile Robot in Bended pipe”, IEEE Int. Conf. Industrial Technology, 558-593, 2002.
10. Xiaohua Zhang, Hongjun Chen, “Independent Wheel Drive and Fuzzy Control of Mobile Pipeline Robot with Vision”, IEEE Int. Conf. Industrial Electronics Society, 2526 – 2530, 2003.