

https://doi.org/10.7236/JIIBC.2020.20.6.167
JIIBC 2020-6-24

파이프 구조물 검사를 위한 파이프 등반 로봇의 장애물 회피 제어 연구

A Study on the Obstacle Avoidance Control of Pipe Climbing Robot for Pipe Structure Inspection

이스라엘*, 이성욱**, 박종원***

S-Ra-El Lee*, Sung-Uk Lee**, Jong-Won Park***

요 약 원자력발전소와 석유화학의 노후화된 파이프 구조물을 검사를 위하여 파이프 등반 로봇에 많은 연구가 이루어졌다. 그러나 파이프 등반 로봇 연구에서는 대부분 파이프 등반 로봇의 구조 설계와 기본적인 동작 제어에 초점을 맞추고 제작되어, 작업자가 파이프 등반 로봇을 제어하기 위해서는 수동 조작으로 파이프를 등반 및 장애물 회피하기 위해 많은 어려움을 가진다. 본 논문에서는 파이프 등반 로봇의 카메라 영상을 이용하여 장애물을 인식하고 파이프 등반 로봇과 장애물 사이의 거리를 추정 및 파이프 등반 로봇이 파이프를 잡을 수 있는 위치를 결정하여 파이프 사이의 장애물을 회피 할 수 있는 알고리즘을 제안한다.

Abstract A lot of research has been done on pipe climbing robots to investigate the aging pipe structures of nuclear power plants and petrochemical plants. Nevertheless, most of the research on pipe climbing robots focused on the structural design and foundational motion control of pipe climbing robots. So, For the operator to control the pipe climbing robot, it has many difficulties to climb the pipe and avoid obstacles by manual operation. In this paper, propose an algorithm that recognizes obstacle by using camera images of pipe climbing robots, estimates the distance between pipe climbing robots and obstacles, and determines the position where pipe climbing robots can catch pipes to avoid obstacles between pipes.

Key Words : Pipe Climbing, Pipe Climbing robot, Pipe Recognition, Camera, Obstacle Avoidance

1. 서 론

원자력발전소, 석유화학 플랜트 등 산업플랜트 및 건축물에 있는 파이프(배관)들은 고온·고압의 증기나 유체가 흐르며, 시간이 지나감에 따라 점차 노후화 된다. 이러

한 파이프 들은 보존 상태와 경제성, 안전성에 따라 적절한 시기에 검사와 보수를 해야 한다.^{[1][2]} 하지만 파이프는 사람이 접근이 힘든 지역(예로서 방사능, 고소지역 등)에 있는 검사 시에 작업자의 위험이 뒤따르므로, 최근에는 작업자 대신 로봇을 이용한 검사를 연구하게 되었다.^[3-8]

*정희원, 충남대학교 정보통신학과

**정희원, 한국원자력연구원

***정희원, 충남대학교 정보통신학과(교신저자)

접수일자 2020년 10월 8일, 수정완료 2020년 11월 8일
게재확정일자 2020년 12월 4일

Received: 8 October, 2020 / Revised: 8 November, 2020 /

Accepted: 4 December, 2020

***Corresponding Author: jwpark@cnu.ac.kr

Dept of Information Communications Engineering, ChungNam National University, Korea

파이프 구조물을 검사하기 위해서는 파이프 구조물 사이에 존재하는 장애물(플랜지, 브랜치등)을 회피할 수 있도록 다관절(Manipulator) 및 그립(Grip) 장치의 구조를 가진 로봇이 필요하며, 이를 파이프 등반 로봇(Pipe Climbing Robot)이라 하여 여러 연구가 진행 되었다.^[3-8] 기존의 파이프 등반 로봇 연구에서는 대부분 등반 로봇의 구조 설계와 기본적인 동작 제어에 초점을 맞추고 제작되어, 작업자가 파이프 구조물의 사전 정보(3D 모델링, 설계도 등)를 숙지하고 수동으로 조작하도록 구성되었다. 따라서 파이프 등반 로봇의 제한한 방법 파이프 등반 로봇은 파이프 구조물의 검사를 위해 사전 정보와 수동 조작만으로 로봇을 이동 및 검사하기 힘들다는 단점이 있다.

현재까지 연구되고 있는 파이프 등반 로봇의 파이프 인식은 라인 레이저를 파이프에 주사하여 얻은 영상의 차 영상을 이용하여 추출 후 영상을 누적시켜 파이프의 외관을 인식하는 방법^[4]과 RGB-D 카메라와 외부의 카메라를 이용하여 파이프를 인식하는 방법,^[5] 주변의 파이프를 인식하기 위해 레이저 스캐너, 카메라, 초음파 센서를 이용한 방법^[6]등 파이프를 인식 및 잡는 방법은 있으나, 파이프 등반 로봇이 이동 하면서 파이프 사이의 장애물을 인식 및 회피에 대한 연구는 이루어지지 않았다.

파이프 등반 로봇의 구조상 파이프 사이의 장애물을 회피 하기 위해서는 파이프 등반 로봇의 그립퍼(Gripper)와 장애물과의 거리를 가깝게 하여 로봇이 장애물을 회피 후 그립퍼를 잡을 수 있도록 장애물과 로봇의 그립퍼 사이의 위치를 추정해야 한다. 또한 로봇 팔이 장착된 이동형 로봇을 원격지에서 실수 없이 조종하여 파이프 사이의 장애물 및 로봇 자체가 파이프를 이동하는 기술은 필요하다.

본 논문에서는 파이프 등반 로봇이 자율 이동을 위해 파이프 등반 로봇의 카메라로부터 얻은 영상을 이용하여 파이프 상의 장애물을 인식하고, 로봇과 장애물 사이의 거리를 추정하여 로봇의 그립퍼와 장애물 사이의 잡는 위치를 추정 할 수 있는 기술이 요구되며, 파이프 등반 로봇이 장애물을 회피 할 수 있는 제어 알고리즘을 제안 한다

II. 파이프 등반 로봇

본 연구에 사용된 파이프 등반 로봇은 한국원자력연구원에서 제작된 로봇으로 그림 1과 같이 4인치(Inch) 파

이프 및 파이프 상의 장애물을 회피하며 이동 할 수 있도록 2개의 그립퍼와 5DOF (Degree of freedom)의 구조이며, 양쪽 Gripper의 위쪽에 2개의 640×480의 해상도를 가진 카메라와그립퍼와 파이프의 접촉 면에 근접 센서 4개를 가지고 있으며, 무게는 3.8Kg, 로봇의 전체 길이는 900mm이며, 14.8v 5Ah, 7.4v 2A의 2개의 배터리를 가지고 있다.

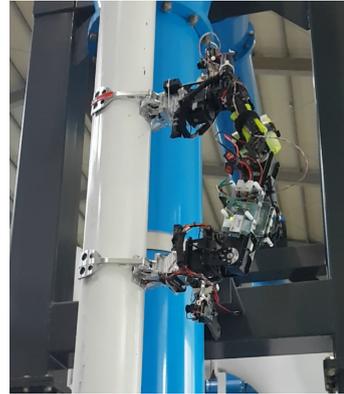


그림 1. 파이프 등반 로봇
Fig. 1. The pipe climbing robot

파이프 등반 로봇은 파이프 사이의 장애물을 회피하기 위해서는 장애물의 높이와 넓이의 제약을 가지며, 그림 2와 같이 파이프 등반 로봇이 장애물을 회피 하기 위해서 그림2의 그립퍼A의 위치가 너무 멀리 떨어져 있으면 파이프 등반 로봇이 장애물을 회피 할 수 없고, 너무 가까우면 파이프 등반 로봇의 그립퍼 및 카메라가 장애물과 충돌이 일어 날 수 있으므로 그립퍼와 장애물과의 잡는 위치 선정이 중요하며 파이프 등반 로봇의 그립퍼가 장애물과 가까울수록 장애물의 회피가 용이 하다.

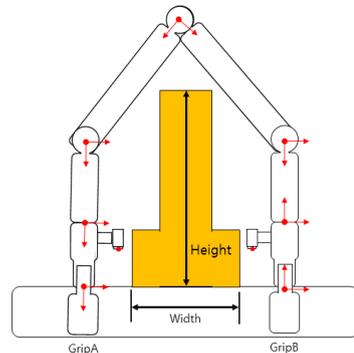


그림 2. 파이프 등반 로봇과 장애물과의 관계
Fig. 2. Relationship between pipe climbing robot and obstacle

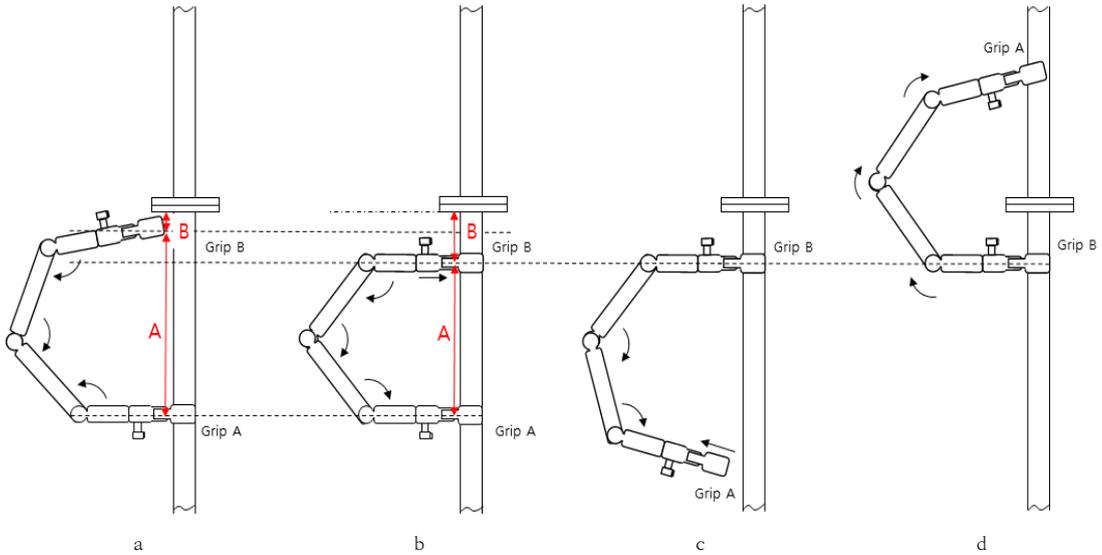


그림 3. 파이프 등반 로봇의 장애물 회피 도식화
 Fig. 3. Schematic of obstacle avoidance for pipe climbing robots

파이프 등반 로봇은 파이프를 등반 하면서 움직일 수 있는 여러 방법의 움직임을 가지고 있으며,^{[7][8]} 이를 이용하여 장애물 회피하기 위해서는 그림 3의 a에서 d까지의 순서로 순차적으로 장애물을 회피 하면서 파이프를 등반 하는 것을 볼 수 있다.

그림 3의 a는 그리퍼 B와 장애물과의 거리를 파이프 등반 로봇의 카메라를 이용하여 B의 거리를 추정하고, A의 거리를 결정한다. 그림 3의 b는 그리퍼 B의 위치를 결정한 후 파이프를 잡는 것을 볼 수 있으며, 그림3의 c는 그리퍼 A를 풀어 장애물을 넘을 수 있도록 준비하며, 그림3의 d는 그리퍼 A를 뒤집어 장애물을 넘을 것을 보여주고 있다.

III. 파이프 등반 로봇의 장애물 회피

파이프 등반 로봇이 파이프를 등반 하면서 장애물을 인식 및 회피 하기 위해서는 그림 4와 같은 순서로 이루어진다. 파이프 등반 로봇이 파이프를 등반 하면서 전달해 주는 영상정보를 이용하여 파이프의 외 각정보를 인식하여 파이프를 구분하면 파이프 등반 로봇의 역 기구학(Inverse kinematic)을 이용하여 로봇의 각 관절 각을 정하며, 이를 이용하여 로봇의 그리퍼가 파이프를 잡을 수 있게 된다.^[4]

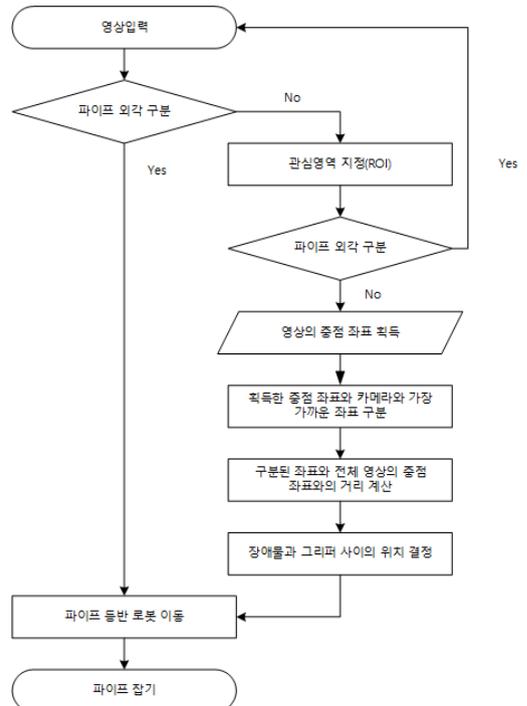


그림 4. 로봇의 파이프 인식 및 장애물과의 거리 추정과 로봇의 이동거리 계산 흐름도

Fig. 4. Pipe recognition and distance estimation with obstacles of robot and flow chart of robot's distance calculation

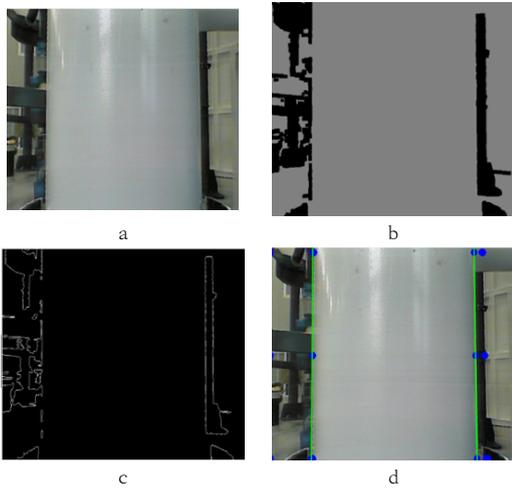


그림 5. 로봇의 카메라 영상을 이용한 외곽선 추출
Fig. 5. Extraction of outer line using camera image of robot

그림 5와 같이 파이프 등반 로봇은 배경과 파이프를 영상을 분할(Image Segmentation) 위하여 워터셰드 알고리즘(Watershed Algorithm) 기법을 적용하였다.^{[9][10]} 그림. 5는 파이프 등반 로봇의 카메라로부터 전달 받은 영상(그림.5(a))을 Mask 영상을 만들고(그림. 5(b)) 이를 이용하여 워터셰드 영상을 만든 후(그림.5(c)) 허프 직선 변환(Hough line transform)을 이용하여 파이프 외곽선을 구분 하였다(그림.5(d)).

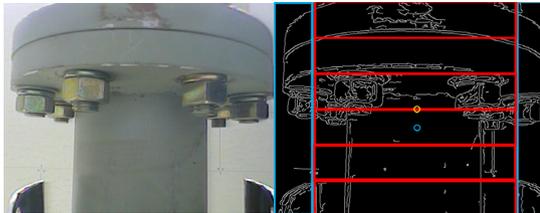


그림 6. 파이프 사이의 장애물 영상 및 ROI 영상
Fig. 6. Obstacle Image and ROI Image between Pipes

파이프 등반 로봇이 파이프 외곽선을 구분하지 못하였을 경우 그림 6의 붉은 사각형과 같이 전체 영상을 ROI(Region of interest) 하여 영상을 구분하고 관심 영역으로 구분하여 각 영상을 외곽선 인식을 이용하여 파이프 외곽을 구한다. 여기서 외곽선이 구분되지 않은 ROI 영상의 중점 좌표를 구한다. 이렇게 구해진 중점 좌표와 카메라의 위치로부터 가장 가까운 중점좌표(그림6의 파란색 원)와 전체 영상의 중점좌표(그림6의 노랑색 원)

를 이용하여 장애물까지의 거리를 추정하고 이 추정된 값을 이용하여 파이프 등반 로봇이 파이프를 잡는 위치를 정하게 되고, 파이프 등반 로봇을 이동시켜 파이프를 잡게 된다.

파이프 등반 로봇이 장애물과 그리퍼 사이의 위치를 추정하기 위해서는 그림. 7과 같이 파이프를 잡고있는 그리퍼A에서 각 $L_0 \sim L_5$ 까지의 관절 길이와 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$ 만큼 회전하였을 때, 그리퍼B의 위치좌표 (x_6, y_6, z_6)를 구하려면 식1의 기구학(Kinematics)을 이용하여 좌표상의 위치를 구할 수 있다. 식1의 T는 변환 행렬을 나타내며 각 관절의 길이 및 회전 각의 변환을 이용한다. 그리고 식 2를 이용하여 카메라의 중점의 위치좌표(x_c, y_c, z_c)를 구할 수 있다.

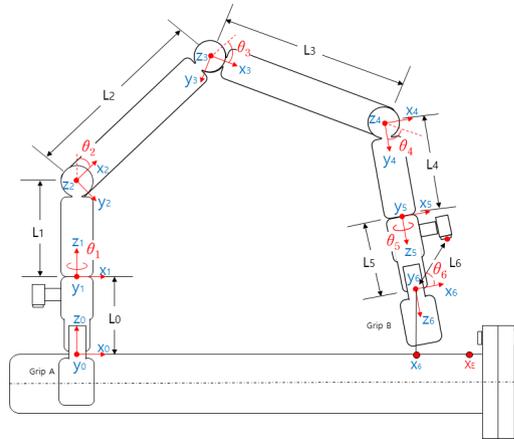


그림 7. 파이프 등반 로봇의 기구학적 구조
Fig. 7. The kinematics structure of the pipe climbing robot

$${}^0_G T = {}^0_1 T {}^1_2 T {}^2_3 T {}^3_4 T {}^4_5 T {}^5_G T \quad (1)$$

$${}^0_C T = {}^0_1 T {}^1_2 T {}^2_3 T {}^3_4 T {}^4_5 T {}^5_G T {}^G_C T \quad (2)$$

그림 8은 파이프 등반 로봇의 그리퍼와 장애물 사이를 좀더 명확히 보여주고 있다. X_E 카메라 영상의 중점이며, X_C 는 기구학으로 구한 카메라의 높이를 말하고 있으며, θ_7 를 구해 X_C 와 X_E 까지의 거리를 추정 할 수 있다. θ_7 를 구하기 위해서는 Z_C 에서 부터 X_E 까지의 거리 D_c 를 알아야 한다.

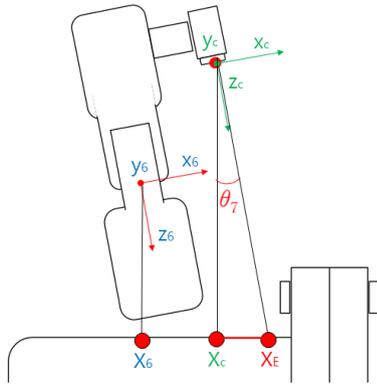


그림 8. 로봇과 파이프 사이의 장애물 도식화
 Fig. 8. Schematization of obstacles between robot and pipe

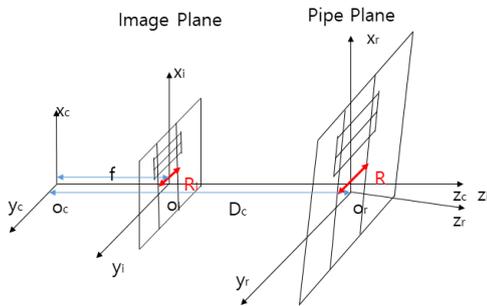


그림 9. 파이프 등반 로봇의 카메라 좌표 변수
 Fig. 9. Camera Coordinate Variables of Pipe Climbing Robot

D_c 를 구하기 위해서는 그림 9와 같이 실제 물체의 직경을 이용하여 하며 식(3)을 통해 D_c 를 구할 수 있으며, 현재 위치에서의 영상의 픽셀의 실제 크기를 추정할 수 있다.

$$D_c : f = R : R_i \therefore D_c = \frac{fR}{R_i} \quad (3)$$

이렇게 구한 D_c 를 식(4)를 이용하여 θ_7 를 구할 수 있다.

$$\cos\theta_7 = \frac{D_c}{z_c} \quad (4)$$

식(4)에서 구해진 X_c 에서 부터 X_E 까지의 거리와 X_0 에서 부터 X_c 까지의 거리 합으로 식(5)와 같이 카메라의 중점인 X_E 까지의 거리를 구할 수 있다.

$$X_E = X_c + D_c \tan\theta_7 \quad (5)$$

이렇게 구해진 전체 영상의 중점(그림6의 노랑색 원)과 구분된영상의 중점(그림6의 파란색 원)의 거리를 이용하여 로봇과 장애물과의 거리를 추정할 수 있다.

IV. 실험 및 검증

제안된 방법을 검증하기 위해 Fig. 10과 같은 파이프 목업을 이용하여 실험을 하였다. 실험 목업은 높이 6m로 구성되어 있으며 로봇은 1m 지점에서 출발하여 그림 10과 같이 3m 위치의 파이프 플랜지 부분의 장애물을 파이프 등반 로봇이 장애물을 회피 하는 것을 실험하였다.



그림 10. 파이프 등반 로봇의 실험 시설
 Fig. 10. the experimental facility of the pipe climbing robot

그림 11과 같이 파이프 등반 로봇이 파이프를 등반하면서 장애물을 인식 및 거리를 추정하고(그림 11(a)), 파이프 등반 로봇과 장애물과의 위치를 선정 후 파이프를 잡는다.(그림 11(c)) 그리고 파이프 등반 로봇이 파이프 사이의 장애물을 회피하여 이동하는 것을 볼 수 있다.(그림 11(d~h))

V. 결론

본 논문은 파이프 구조물 검사를 위한 파이프 등반 로봇이 파이프 사이의 장애물을 회피하는 알고리즘을 제안하였다. 파이프 등반 로봇이 파이프 사이의 장애물을 인식하고 장애물을 회피하기 위해 파이프 사이의 장애물과 파이프를 잡는 그리퍼 사이의 거리를 추정하고 파이프 등반 로봇이 파이프를 잡는 위치를 선정 하여 파이프 등반 로봇이 장애물을 회피 할 수 있도록 하였다. 그리고

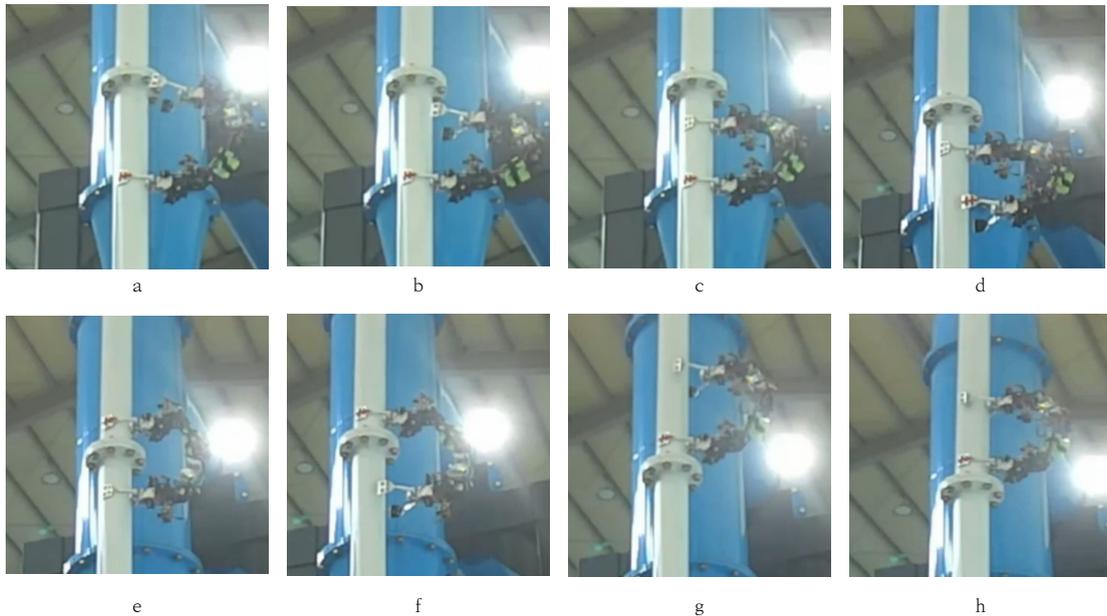


그림 11. 파이프 등반로봇의 장애물 회피 실험

Fig. 11. An Experiment on Obstacle Avoidance of Pipe Climbing Robot

파이프 등반 로봇이 작업자의 수동이 아닌 자동으로 장애물을 회피 할 수 있는 것을 볼 수 있다.

향후 파이프 등반 로봇이 파이프를 자동으로 움직이면서 파이프 사이의 장애물을 회피 및 위치를 추정 할 수 있는 방법 등을 연구하여 파이프 검사 로봇이 원격지의 조종자가 로봇의 조종을 최소화 할 수 있는 검사 로봇의 자동화 연구가 계속 수행 되어야 할 것이다.

References

- [1] Jung-Soo Song, Sang-Hoon Shim, Ji-Yoon Kim, Kee-Bong Yoon, "A Study on Implementation of Risk Based Inspection Procedures to a Petrochemical Plant", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 27, No. 3, pp. 416-423, 2003.
DOI: 10.3795/KSME-A.2003.27.3.416
- [2] Chan-Hee Cho, Hee-Jong Lee, Tae-Hun Lee, "Simulation of Eddy Current Testing Signals Using Simulation Software Dedicated to Nondestructive Testing", Transactions of the Korean Society of Pressure Vessels and Piping, Vol. 10, No.1, pp. 75-81, 2014.
<https://doi.org/10.20466/KPVP.2014.10.1.075>
- [3] Baek-suk Chu, Kyung-mo Jung, Chang-Soo Han, Dae-hie Hong, "A survey of climbing robots: Locomotion and adhesion", International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 11, No. 4, pp. 633-647, 2010.
<https://doi.org/10.1007/s12541-010-0075-3>.
- [4] Jae-Hee Kim, Jae-Cheol Lee, You-Rack Choi, "Vision-based pipe-climbing robot for spray-pipe inspection in nuclear plants", International Journal of Advanced Robotic systems, Vol. 15, No. 6, 2018.
<https://doi.org/10.1177/1729881418817974>
- [5] Zhiguang Xiao, Wenqiang Wu, Junjun Wu, Haifei Zhu, Manjia Su, Huaizhu Li, Yisheng Guan, "Gripper self-alignment for auto-nomous pole-grasping with a biped climbing robot", International Conference on Robotics and Biomimetics(ROBIO), pp. 181-186, Dec. 2012. 10.1109/ROBIO.2012.6490963
- [6] Mahmoud. Tavakoli, Lino. Marques, Anibal T. de Almeida, "3DCLIMBER: Climbing and manipulation over 3D structures", Mechatronics, Vol. 21, No. 1, pp. 48-62, Feb, 2011.
<https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2010.08.006>
- [7] Yisheng Guan, Li Jiang, Haifei Zhu, Wenqiang Wu, Xuefeng Zhou, Hong Zhang, Xiangmin Zhang, "Climbot: A Bio-inspired Modular Biped Climbing Robot—System Development, Climbing Gaits and Experiments", Journal of Mechanisms and Robotics, Vol. 8, No. 2, pp. 021026, Jan 2016.
<https://doi.org/10.1115/1.4028683>
- [8] S-Ra-El Lee, Jae-Hee Kim, Jae-Cheol Lee, You-Rack Choi, "Trajectory planning of remotely controlled

multi-joint mobile robots with limited motor power”, Korean Society for Precision Engineering, pp. 285-286, May, 2012. 2005-8446(pISSN)

- [9] Meyer F, “Sequential algorithms for cell segmentaion: maximum efficiency? in processing, International symposium on Clinical Cytometry and Histometry, Schloss Elmau 1986.
- [10] Dong-In Park, Tae-Won Kim, Yuh-Ho Ko, Jae-Gark Choi, “Modified Watershed Algrithm for Extracting Correct Edge and Reducing Processing Time”, Journal of Koera Multimedia Society Vol. 12, No. 10, pp. 1463-1473, 2010
1229-7771(pISSN) / 2384-0102(eISSN)
- [11] Dong-Gyu Lee, Young-Dae Lee, Sung-Yun Cho, “Calculation of Dumping Vehicle Trajectory and Camera Coordinate Transform for Detection of Waste Dumping Position”, Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (IIBC), Vol. 13, No. 1, pp. 243-249, Feb. 2013.
<http://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2013.13.1.243>
- [12] Min-soo Kang, Chunhwa Ihm, Jaeyeon Lee, Eun-Hye Choi, Sang Kwang Lee, “A Study on Object Recognition for Safe Operation of Hospital Logistics Robot Based on IoT”, Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication(IIBC), VOL. 17 No. 2, pp 141-146, Apr. 2017
<http://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2013.13.1.243>

저 자 소 개

이스라엘(정회원)



- 2005년 경상대학교 컴퓨터공학과 학사 졸업.
- 2011년 충남대학교 정보통신공학과 석사 졸업.
- 2011년 충남대학교 정보통신학과 박사 과정.

• 주관신분야 : 병렬처리, 영상처리

이 성 욱(정회원)



- 1993년 KAIST 정밀공학과 졸업
- 1995년 KAIST 기계공학과 석사 졸업
- 2002년 KAIST 기계공학과 박사 졸업
- 2003년 ~ 현재 한국원자력연구원 로봇응용연구부 책임 연구원

• 주관신분야 : 제어 및 응용

박 종 원(정회원)



- 1979년 충남대학교 전자공학과 학사 졸업.
- 1981년 한국과학기술원 전산학과 석사 졸업.
- 1991년 한국과학기술원 전산학과 박사 졸업.
- 1983~1993년 충남대학교 전산학과 부교수

• 1994년 ~ 현재 충남대학교 정보통신학과 교수
• 주관신분야 : 병렬처리, 영상처리, 의학영상처리

※ 이 논문은 2020년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(20201510300280, 원전해체 가상작업장 및 힘-토크 반응 원격해체작업 훈련 시스템 개발)