

파이프 내부검사를 위한 이동로봇의 유도방법

Guidance of Mobile Robot for Inspection of Pipe

*정규원(충북대학교 기계공학부)

Kyuwon Jeong(CBNU, School of Mech. Eng.)

Abstract

The purpose of this paper is the development of guidance algorithm for a mobile robot which is used to acquire the position and state information of the pipe defects such as crack, damage and through hole. The data used for the algorithm is the range data obtained by the range sensor which is based on an optical triangulation method. The sensor, which consists of a laser slit beam and a CCD camera, measures the 3D profile of the pipe's inner surface. After setting the range sensor on the robot, the robot is put into a pipe. While the camera and the LSB sensor part is rotated about the robot axis, a laser slit beam (LSB) is projected onto the inner surface of the pipe and a CCD camera captures the image. From the images the range data is obtained with respect to the sensor coordinate through a series of image processing and applying the sensor matrix. After the data is transformed into the robot coordinate, the position and orientation of the robot should be obtained in order to guide the robot. In addition, analyzing the data, 3D shape of the pipe is constructed and the numerical data for the defects of the pipe can be found. These data will be used for pipe maintenance and service.

I. 서 론

각종 수도관, 송유관, 도수로, 하수관 등에 대수

경의 파이프들이 산업 현장의 많이 사용되고 있다. 이들은 연장길이가 매우 길며, 여러 갈래로 지관이 연결되어 있으며, 주로 지하에 매설되어 있다. 이러한 대형 관들은 지형의 변화, 지상의 각종 공사 작업등에 의하여 파손되는 경우가 많이 있는데, 이들을 정기적으로 검사 보수하여야 한다. 현재의 검사 방법은 로봇에 장착한 CCD 카메라에 의해 촬영된 비디오크를 보면서 육안으로 분석한 후 보수대상을 결정하고 있으나, 결함의 위치나 상태를 수치 데이터화하지 못하고 있다. 특히 하수관의 결함 내역 및 파손율을 보면 연결 관 불량(34.8%), 이음부 불량(30.9%) 관침하 및 파손(13.5%), 타관 통과(2.8%), 토사퇴적 및 기타 장애(18.0%)로 나타나고 있으며, 환경부 발표자료에 따르면 전국 평균 7m 간격으로 관의 결함이 있는 것으로 나타났다. 이러한 하수관의 노후나 파손으로 인한 누수의 위험을 사전에 검사하여 적절한 조치를 취할 수 있는 검사 시스템 구현하여야 한다. 본 논문에서는 여기에 사용되는 이동로봇의 행을 안정적으로 유도할 수 있는 방법의 개발에 중점을 두었다. 원격 조종할 수 있는 검사용 로봇에 센서 시스템을 부착하여 관 내부에 진입시켜 관의 내벽에 레이저 슬릿 빔을 주사하고, 카메라에 의해 거리영상을 획득하여 균열의 상태 및 위치 데이터를 얻는다. 거리영상 획득방법에는 광 삼각법 측정의 원리가 적용된다. 여러 가지 방법이 있겠으나, 본 논문에서는 1개의 카메라와 1개의 레이저 슬릿 빔을 이용하였다.

II. 파이프 검사용 로봇

1. 파이프 검사용 로봇 개요

파이프 검사용 로봇은 여러 가지 형태가 국내외에 개발되어 있으나, 본 연구에서는 Fig.1 과 같은 로

봇을 하수관의 검사 보수에 중점을 두어 개발하였다. 이 로봇은 크게 3부분으로 구성되어 있다[1]. 로봇의 선단부에는 다중 공구 모듈과 전방·감시용 카메라가 설치되어 있고, 중앙부는 로봇의 몸체로서 구동부분, 제어기등이 내장되어 있으며, 후미에는 검사장치가 설치되어 있다.

로봇 선단의 다중공구 모듈에는 지관 제거용 공구와 보수용 공구가 장착되어 있으며, 보수용 공구는 45도로 경사진 축을 중심으로 회전하여 전방 또는 수직방향의 임의의 각도로 위치가 가능하다. 또한 전방감시용 카메라가 설치되어 있어 조작자에게 하수관 내부의 상태를 전송해준다.



Fig. 1 Inspection robot for a sewage pipe

중앙부의 구동부는 전차에 사용되는 형태의 무한궤도 차륜을 사용하였다. 이로써 하수관 내부에 침전물이 있을 경우에도 안정된 운전이 가능하다.

후미에는 Fig. 2와 같이 하수관 내부의 형상을 수치적인 데이터로 추출할 수 있는 검사장치를 설치하였다. 이 장치는 1 개의 CCD 카메라와 슬릿빔 레이저로 구성되어 있으며, 로봇의 길이방향 중심축을 기준으로 회전하도록 되어 있어서, 하수관 내부의 형상을 모두 구할 수 있다[2,3].

Table 1 Specifications of Range Sensor Components

Components	Specifications
Image Grabber	Oscar-V 768x494x8bit
CCD Camera	IK-UM42 640x480pixels JK-L03U f=3mm
Diode Laser	PM690-30 $\lambda = 690\text{nm}$, $P_o = 7\text{mW}$

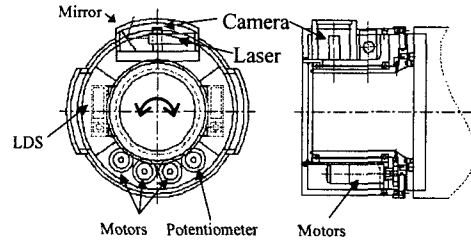


Fig. 2 The configuration of the range sensor

하수관에 투입된 로봇은 하수관을 따라 이동하면서 시각장치를 이용하여 하수관의 상태를 연속적으로 촬영하며, 조사된 자료를 근거로 보수역할도 한다. 따라서 가장 중요한 것은 검사 작업시 최대한 정밀한 데이터를 얻는 일이다. 그러나 하수관 내부가 어둡고, 조명을 사용하더라도 불완전하기 때문에 작업자가 파손부위를 지나칠 수 있으며, 정확한 크기를 알기가 어렵다. 따라서 본 논문에서는 로봇 후미에 부착된 검사장치를 이용하여 이러한 점을 해결하고자 한다.

관 내부의 파손 부분이 발견되면 로봇 후미의 검사장치가 일정한 간격으로 회전하면서 스캐닝한 화상정보는 조작반의 컴퓨터에 전송된다. 이를 영상처리를 하여 거리영상 데이터를 얻는다. 이를 파손이 없는 하수관의 형상과 비교하여 파손 여부를 판단하고, 수치화 한다. 또한 이로부터 로봇의 위치 및 자세를 산출하여 Fig.3과 같이 관을 기준으로 로봇이 계속 이동할 수 있도록 한다.



Fig. 3 The mobile robot in the pipe

2. 관 내부 검사 및 주행유도용 센서

관 내부의 거리 영상을 획득하기 위한 센서는 Fig. 2 와 같이 1 개의 CCD 카메라와 이로부터

일정한 거리만큼 떨어져 있는 슬릿 빔 레이저 발생기로 구성되어 있다. 슬릿 빔이 관 내벽에 주사되면, 이것이 관 내벽과 교차된 궤적이 나타난다. 이를 CCD 카메라로 영상을 획득하고, 여러 단계의 영상처리를 거쳐서 슬릿 빔 궤적의 3차원 공간 좌표를 구한다. 이를 위하여 본 센서는 미리 캘리브레이션 되어 있어야 한다[3]. CCD 카메라 영상에서 슬릿 빔 궤적의 영상 좌표 (u, v) 와 센서의 기준점으로 부터 공간 좌표 $(x, y, z)_s$ 의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} B_1 & B_2 & 1 \\ a_{11}-u a_{41} & a_{12}-u a_{42} & a_{13}-u a_{43} \\ a_{21}-v a_{41} & a_{22}-v a_{42} & a_{23}-v a_{43} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -B_4 \\ u a_{44}-a_{14} \\ v a_{44}-a_{24} \end{bmatrix} \quad (1)$$

위의 식에서 B_k 는 슬릿 빔을 정의한 계수이며, a_{ij} 는 카메라의 외적, 내적인 관계를 나타내는 매개변수이다. 위의 식을 다시 계산하여 정리하면 다음 식 (2) 와 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} s \times x_s \\ s \times y_s \\ s \times z_s \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

위의 식을 이용하기 위하여 m_{ij} , 따라서 B_k 와 a_{ij} 를 미리 구하여야 한다. 이를 위하여 캘리브레이션 장치를 구성하고, 미리 알려진 좌표들을 이용하여 이들 매개변수를 구한다[3,4]. 이 과정을 거쳐서 구한 m_{ij} 행렬을 Table 2 와 같으며, 이때에 발생한 오차는 x축 $-0.025 \sim 0.87\text{mm}$, y축 $0.111 \sim 0.78\text{mm}$, z축 $0.04 \sim -2.35\text{mm}$ 이다.

이렇게 구한 센서를 기준으로 한 좌표는 다시 로봇을 기준으로 한 좌표로 변환한다. 센서 장치

Table 2 Sensor matrix (unit: 10^5 mm/pixel)

0.0148	-0.0008	-4.3501
0.0000	-0.0144	3.1293
-0.0001	0.0093	3.0325
0.0000	-0.0006	0.1865

는 로봇의 길이 방향 중심축을 기준으로 회전하고 있기 때문에 $(x, y, z)_s$ 와 $(x, y, z)_R$ 의 관계식은 Fig.4를 참조하여 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} -(z_s + \ell) \sin \theta - y_s \cos \theta &= x_R \\ (z_s + \ell) \cos \theta - y_s \sin \theta &= y_R \\ x_s &= z_R \end{aligned} \quad (3)$$

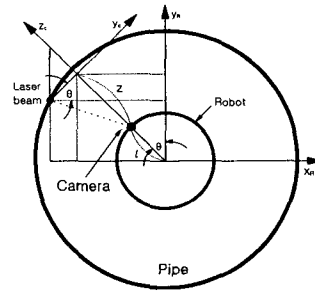


Fig. 4 Range sensor location transform

III. 파이프의 내벽 검사

개발된 시스템을 이용하여 하수관의 결함 검사를 수행하였다. 실험에서는 내경 450mm인 콘크리트 하수관을 실험실에 설치하고, 가상의 결함을 만들었다. 앞에서 기술한 검사장치를 지그에 고정하여 하수관 내부에 설치하고, 로봇에 장착되었을 경우와 같이 회전시키면서, 일정한 간격으로 영상을 획득하였다. 이들 영상을 처리하여 로봇을 기준으로 관 내벽의 좌표를 구하였다. 실험은 두 단계로 수행되었는데, 먼저 센서 시스템을 이용하여 정상적인 부분을 측정하였다. 그 다음 관의 타공이 있는 부분을 측정하여 타당성을 검토하였다.

1. 관의 내경 측정

이 측정은 균열이 없는 관의 내부 지름을 거리 영상으로 측정하여 관의 실제 지름과 비교를 통해 오차를 검증하였다. 카메라와 레이저를 관의 중심 위치서 x_s 축에 평행하게 설치한다. x_s 축 방향으로 레이저 슬릿빔을 길게 비추고, 관의 수직인 상

부를 0°로 하여 시계방향으로 30°간격으로 회전하면서 스캐닝하여 영상을 얻는다. 앞에서 기술한 과정을 따라서 처리하면 로봇기준 좌표를 구할 수 있고 이를 3차원 그래프상에 나타내면 Fig. 5와 같다. 그림에서 보듯이 내부의 직경이 상당히 정확하게 측정이 되었음을 알 수 있다.

2. 관의 타공 검사

관에 발생되는 결함중에는 여러 결함들이 있으나 그 중에 관의 일부분의 파손이나 타공이 제일 많은 비중을 차지 한다. 관의 중심에서 30° 간격으로 스캐닝하다가 결함부위에 다다르면 1°간격으로 세밀히 스캐닝하여 영상을 얻는다. 앞에서 기술한 방법을 따라 영상을 처리하면, Fig. 6과 같은 좌표를 얻을 수 있다. 이 그림에서 보면, 세 방향에서 본 좌표를 이용하여 타공의 위치, 크기를 정확히 구할 수 있다.

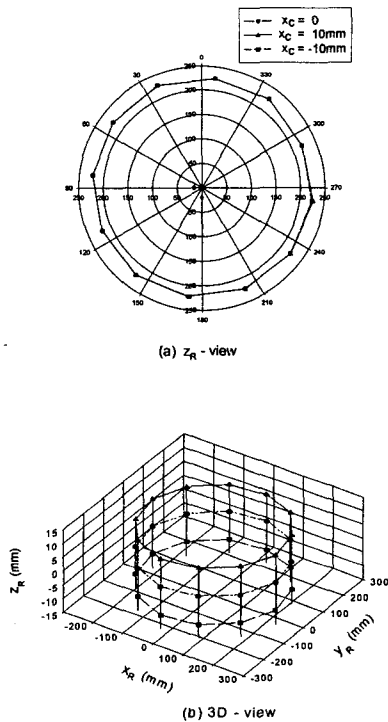
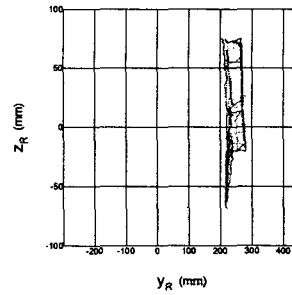
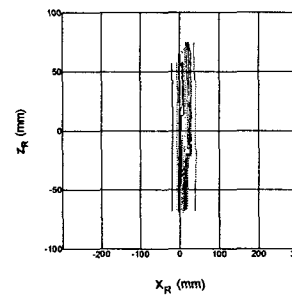


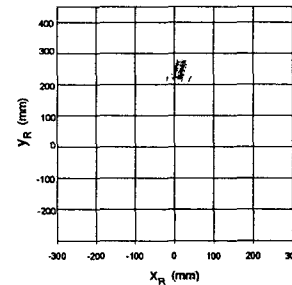
Fig. 5 Measurement result of pipe 450A inside dia. ($y_c=0$)



(a) x axis - view



(b) y axis - view



(c) z axis - view

Fig. 6 Result of the defect measurement of pipe 450A

IV. 이동로봇의 유도방법

앞에서 언급한 바와 같이 관 내부에 투입된 로봇은 관을 따라 전진하게 되는데, 관의 단면이 원형으로 대형이기 때문에 관의 길이 방향으로 전

진할 때 좌우로 방향이 틀어지는 경우가 발생되며, 또한 관의 바닥에 침전물이 쌓여 있을 경우는 더욱 이러한 일이 많이 발생된다. 따라서 이동로봇을 관의 길이방향으로 유도할 수 있는 방법이 필요하다. 본 논문에서는 관의 내벽을 검사하기 위해 얻은 거리 데이터를 이용하여 로봇의 기준축으로부터 관의 방향을 구하는 방법을 개발하였다. 일반적으로 사용될 수 있는 방법은 거리 데이터를 곡면으로 맞추어 관의 형상인 원기둥 곡면을 얻고 이를 이용하여 관의 방향을 구하는 방법을 사용할 수 있다. 그러나 이 방법은 곡선 맞춤을 하는데 계산량이 많고, 과정이 복잡하기 때문에 처리시간이 많이 필요하며 컴퓨터의 성능이 우수하여야 한다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 극복하기 위하여 유전자 알고리즘을 사용하여 계산시간을 단축하고 처리과정을 간략히 한다. 전체적인 처리과정은 Fig.7에 보인 것과 같다.

먼저 앞에서 설명한 것과 같이 LSB/Camera 거리센서를 이용하여 이동 로봇을 중심으로 관 내벽의 거리데이터를 얻는다. 파이프의 방향은 Fig.8과 같이 α 와 β 의 각도로 주어져 있다고 가정하고, 임의의 α 와 β 를 선정한다. 이 선정과정은 유전자 알고리즘의 일부로서 랜덤수를 사용하여 주어진 포플레이션을 이용한다. 앞에서 언급한 거리데이터를 α 와 β 의 각도를 이용하여 좌표변환한다.

$${}^P R_R = R(x_\beta, -\beta)R(y, -\alpha) \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_\beta = {}^P R_R \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_R \quad (5)$$

$[x \ y \ z]_P^T$ 는 가정된 파이프를 기준으로 계산된 관 내벽의 좌표이다. 따라서 이들은 파이프의 중심축인 Z_β 방향에서 보았을 때 파이프의 직경을 갖는 원주상에 있어야 한다. 변환된 좌표축이 파이프의 중심축과 일치하지 않으면 이들은 원주상에 있지 않고 흐트러지게 되며 반지름과 차이를 주게 된다. 따라서 이를 이용하여 주어진 데이터들이 모두 원주상에 있을 때까지 회전

각도를 변화시킨다. 회전각도를 새로 선정할 때 유전자 알고리즘을 이용하여 새로운 세대의 포플레이션을 생성한다. 여기에는 크로스오버, 돌연변이 선기법을 사용하고, 엘리티즘도 적용한다[6].

유전알고리즘에서는 적합도를 이용하여 가장 우수한 유전자를 선택하게 되는데 본 논문에서는 좌표변환된 거리데이터가 파이프의 반경으로부터의 오차가 적은 것을 적합도가 우수한 것으로 하였다.

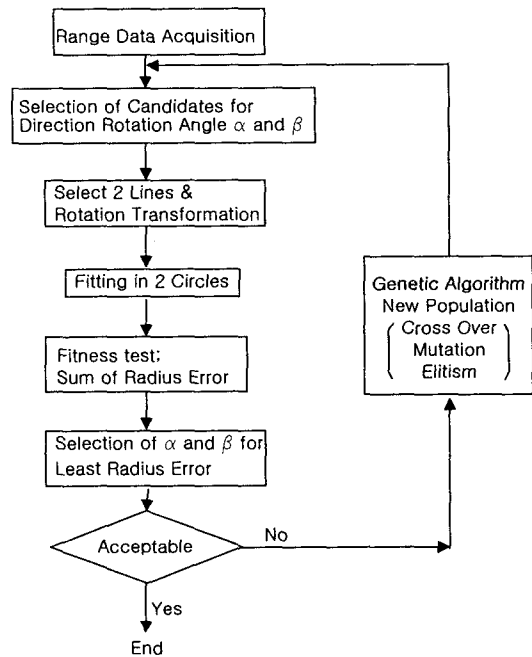


Fig.7 Procedure for steering angle determination

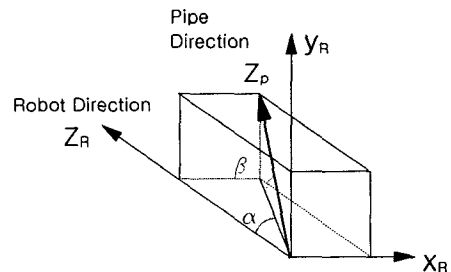


Fig.8 Coord. relation between the mobile robot and pipe axis

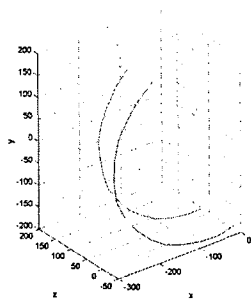


Fig. 9 The range data from the mobile robot to the pipe surface

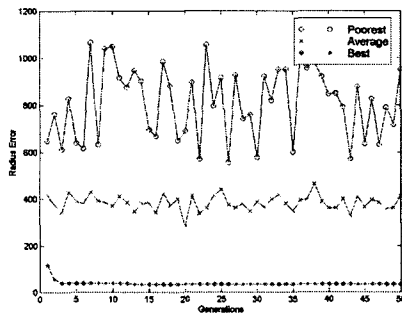


Fig. 10 Fitness (radius error) variation with the population generation

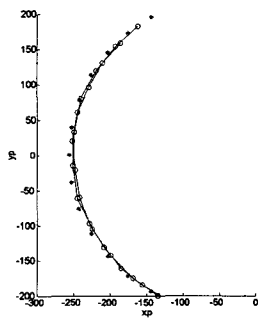


Fig. 11 The aligned range data to the pipe axis

Fig.9 는 이동로봇에 장착되어 있는 LSB/Camera 거리센서를 이용하여 얻은 관의 내벽까지의 거리 데이터이다. Fig.10 은 유전알고리즘에 의하여 회전각도 α 와 β 를 변화시킬 때 세대변천에 따른 반경오차를 보여주고 있다. 15세대 정도에서 수

렴하고 있는 것을 보여주고 있다. Fig.11 은 최종적으로 얻은 회전각도를 이용하여 Fig.9의 데이터를 좌표변환 했을 때 Zp 방향에서 본 데이터의 분포이다. 이로써 이때의 방향으로 로봇을 이동시키면 파이프의 중심을 따라 갈 수 있음을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 대형 파이프의 내부를 검사할 수 있는 이동로봇이 자율적으로 주행할 수 있도록 관의 중심축을 따라 가도록 로봇을 유도하는 방법을 개발하였다. 계산량과 알고리즘의 단순화를 위하여 유전자 알고리즘을 이용하였으며 적용 예를 보였다. 적용결과에서 본 바와 같이 적은 반복 회수로 실용적인 결과를 얻을 수 있었다.

VI. 참고 문헌

1. 김성현, 윤지섭, 박병석, 조명위, 강이석, "하수 관용 로봇의 검사 장치 설계제작", 한국정밀공학회 추계학술대회논문집, pp.681~684, 1998.
2. 박현구, 김승우, 박준호, "슬릿광 주사방법에 의한 자유곡면의 삼차원 형상 측정", 대한기계학회 논문집, 제17권, 제5호, pp.1202-1207, 1993.
3. 이병술, 레이저 슬릿 빔을 이용한 관의 결함 검사 방법에 관한 연구, 충북대학교 교육대학원, 석사학위 논문, 1999.2.
4. Roger Y. Tsai, "A versatile camera calibration technique for high accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV camera and lens", IEEE, Journal of robotics and automation, Vol.3, No.4, pp.323-344, 1987.
5. Chang Woo Reeu and Kyu Won Jeong, "Distortion correction of fisheye lens for wide angle range finder", '95 Second asian conference on computer vision, pp.II-200~II-204, 1995.
6. J. S. R. Jang, C. T. Sun and E. Mizutani, Neuro-Fuzzy and Soft Computing, Prentice Hall, 1997.