

검사용 로봇을 위한 원기둥형 물체의 자세 추정 방법

정규원*

(논문접수일 2002. 5. 10, 심사완료일 2002. 11. 25)

Pose Estimation of a Cylindrical Object for an Inspection Robot

Jeong, Kyuwon*

Abstract

The cylindrical object such as a water pipe or an oil pipeline are widely used in the infrastructure. Those pipes should be inspected periodically by human or a robot. However, since there is no edge or vertex in the pipe, it is very difficult for the robot to navigate along the pipe. In this paper in order to guide the robot along the axis of the pipe, an algorithm which find the axis using the measured range data from the robot to the pipe wall is developed. The algorithm is verified using both the simulated range data and the measured one.

Key Words : Inspection Robot(검사용 로봇), Cylindrical Object(원기둥형 물체), Surface Fitting(곡면 맞춤), Principal Direction(주 곡률방향), Normal Curvature(법선 곡률), Normal Vector(법선벡터), Tangential Vector(접선벡터)

1. 서론

각종 기간시설 즉 상수도, 송유관, 하수도등에 대형 파이프가 많이 사용되고 있으며, 또한 각종 기계부품에도 원기둥형 부품이 많이 사용되고 있다. 대형 파이프에 발생한 각종 결함을 검사하기 위하여 점차 검사용 로봇을 사용하는 추세이며, 이들 로봇은 자율적인 주행을 하는 것이 바람직하다. 그러나 이들 파이프 또는 원기둥형 물체는 주행 방향의 기준으로 사용할 수 있는 모서리 또는 꼭지점이 없기 때문에 로봇이 주행할 때 주행 방향을 유지하기 어렵다. 그

러나 검사용 로봇에는 파이프의 표면 상태를 검사하기 위하여 검사용 거리 센서가 장착되어 있으므로, 이를 이용하여 로봇을 기준으로 물체의 방향을 추정하고자 한다. 이렇게 구해진 방향은 이동형 검사용 로봇을 유도하는데 사용될 뿐만 아니라, 물체의 자세에 맞추어 작업해야되는 보수 작업 등에도 사용될 수 있으며, 검사 데이터를 기록할 때에도 유용하게 사용된다. 또한 원기둥형 물체는 파이프뿐만 아니라 각종 기계부품으로 많이 사용되고 있으므로, 부품의 핸들링 또는 용접작업등에도 유용하게 적용될 수 있다^(1,2).

본 논문에서는 참고문헌에서 사용된 방법과 다르게, 측정

* 주저자. 충북대학교 기계공학부 (jeong@cbucc.chungbuk.ac.kr)
주소: 361-763 충북 청주시 흥덕구 개신동 산48

된 표면의 3차원 좌표를 곡면 맞춤을 하여 곡면에 관한 다항식을 구하고, 이로부터 곡면상의 임의의 점에서 법선 벡터와 곡률이 최대가 되는 방향의 접선 벡터를 구하여 물체의 중심축 방향을 구한다. 이 중심축 방향 벡터가 구해지면 로봇 좌표계부터 물체가 놓여진 방향이 구해진다.

2. 자세 추정 방법

본 논문에서 로봇에 부착된 거리 센서를 사용하는 것은 관의 벽면의 상태를 검사하는 것이 주된 목적이므로, 사용자가 정의하는 관의 중심축 좌표계를 기준으로 관의 벽면의 좌표를 사용자에게 주어야 한다. 그러나 이 센서는 로봇에 부착되어 있기 때문에 로봇이 운행중에 로봇과 같이 운동이 일어나므로 일차적으로 로봇의 좌표계를 기준으로 측정된 데이터가 주어진다. 따라서 이 데이터를 이용하기 위해서는 로봇의 중심을 기준으로 측정된 데이터를 관에 정의된 사용자 좌표계로 변환하여야 한다. 이때 로봇좌표계 원점 O_R 와 관에 부착된 사용자 좌표계의 원점 O_P 의 위치가 다르나, 일차적으로 측정된 데이터를 사용자가 편리하게 이해할 수 있고, 로봇의 운행 방향을 구하기 위하여 원점은 일치한다고 가정하여 로봇의 방향을 구한다. 그 후에 측정된 데이터를 사용자 좌표계로 변환하면 로봇과 관의 상대 위치도 알 수 있다. 그러나 본 논문에서는 로봇의 안전한 운영을 위한 관의 방향을 구하는데 주안점을 두도록 한다. Fig. 1에 보인 것과 같이 로봇의 중심에 좌표계 $O_R(x_R, y_R, z_R)$ 을 부여하고, 사용자가 정의한 관의 좌표계 $O_P(x_P, y_P, z_P)$ 가 있으며, 관의 중심축 방향이 y_P 와 일치하는 방향으로 하며, 이는 로봇의 방향 y_R 과 z_R 을 중심축으로 $-\alpha$, $y_R - x_R$ 평면 즉 x_R 축을 중심으로 β 만큼 회전된 방향에 있다고 가

정한다. 먼저 로봇에 부착된 거리 측정용 센서를 사용하여 관 벽면의 점 $P(x_R, y_R, z_R)$ 를 구하고, 로봇에 부여된 기준점부터 파이프 벽면의 한 점은 다음의 벡터로 표시된다.

$$r = x_R i + y_R j + z_R k \quad (1)$$

거리 측정용 센서를 로봇의 중심축을 기준으로 회전시키면서 관 벽면을 주사하여 다수의 점 ($m \times n$) 개의 좌표를 구하고, 이들을 곡면맞춤을 하여 곡면의 다항식을 구한다. 곡면 맞춤에는 여러 가지 형태 또는 더욱 차수가 높은 다항식을 사용할 수도 있으나 가급적 차수가 낮은 것이 계산의 효율성을 위하여 바람직하다. 또한 원기둥형 물체의 표면이 기본적으로 2차 식으로 표현되는 곡면이므로 본 논문에서는 2차 식으로 곡면 맞춤을 한다.

$$z_R = a_1 x_R^2 + a_2 y_R^2 + a_3 x_R y_R + a_4 x_R + a_5 y_R + a_6 \quad (2)$$

측정된 ($m \times n$) 개의 점들에 대하여 위의 식은 다음과 같이 쓰여진다.

$$\begin{bmatrix} x(1,1)^2 & y(1,1)^2 & x(1,1)y(1,1) & x(1,1) & y(1,1) & 1 \\ x(1,n)^2 & y(1,n)^2 & x(1,n)y(1,n) & x(1,n) & y(1,n) & 1 \\ x(2,1)^2 & y(2,1)^2 & x(2,1)y(2,1) & x(2,1) & y(2,1) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x(m,n)^2 & y(m,n)^2 & x(m,n)y(m,n) & x(m,n) & y(m,n) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z(1,1) \\ z(1,n) \\ z(2,1) \\ \vdots \\ z(m,n) \end{bmatrix} \quad (3)$$

위의 다시 간략하게 쓰면

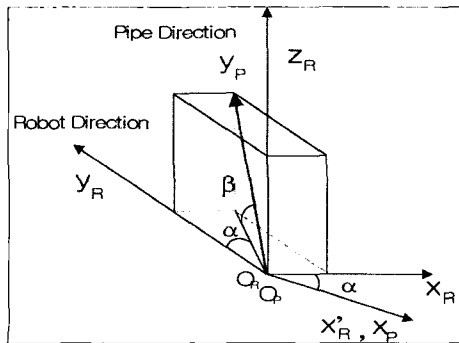


Fig. 1 Reference Coord. for posture description

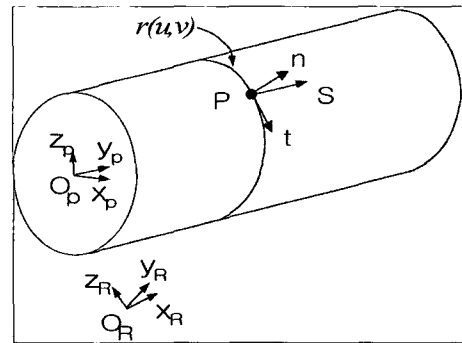


Fig. 2 Principal direction and the related vectors

$$XA=Z \quad (4)$$

가 되며, 이 식에서 A 는 의사 역행렬을 이용하여 다음과 같이 구해진다.

$$A=(X^T X)^{-1}(X^T)Z \quad (5)$$

여기에서 x_R, y_R 를 매개변수 u, v 로 간주하고, 위 식에서 구해진 다항식의 계수 a_i 를 이용하면 곡면 맞춤형 곡면의 식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{r} = & \mathbf{u}\mathbf{i} + \mathbf{v}\mathbf{j} \\ & + (a_1 u^2 + a_2 v^2 + a_3 uv \\ & + a_4 u + a_5 v + a_6) \mathbf{k} \end{aligned} \quad (6)$$

Fig. 2를 참조하여 곡면 \mathbf{r} 상의 한 점 P에서 법선 벡터는 다음과 같이 구해진다.

$$\mathbf{r}_u = \mathbf{i} + (2a_1 u + a_3 v + a_4) \mathbf{k} \quad (7)$$

$$\mathbf{r}_v = \mathbf{j} + (2a_2 v + a_3 u + a_5) \mathbf{k} \quad (8)$$

따라서

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_u \times \mathbf{r}_v &= \begin{bmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ 1 & 0 & B_1 \\ 0 & 1 & B_2 \end{bmatrix} \\ &= -B_1 \mathbf{i} - B_2 \mathbf{j} + \mathbf{k} \end{aligned} \quad (9)$$

이며, 여기에서

$$B_1 = 2a_1 u + a_3 v + a_4, \quad B_2 = 2a_2 v + a_3 u + a_5 \quad \text{이다.}$$

또한 법선벡터의 크기는

$$|\mathbf{r}_u \times \mathbf{r}_v| = \sqrt{B_1^2 + B_2^2 + 1} \quad (10)$$

따라서 점 P에서 법선 벡터 \mathbf{n} 은

$$\begin{aligned} \mathbf{n} = & -\frac{B_1}{\sqrt{B_1^2 + B_2^2 + 1}} \mathbf{i} - \frac{B_2}{\sqrt{B_1^2 + B_2^2 + 1}} \mathbf{j} \\ & + \frac{1}{\sqrt{B_1^2 + B_2^2 + 1}} \mathbf{k} \end{aligned} \quad (11)$$

Fig. 2에서 보는 바와 같이 원기둥형 물체는 최대 곡률을 갖는 방향이 원기둥의 직각 단면이며, 이 단면에 수직인 방향이 중심축의 방향이 된다. 이런 특성을 이용하여 중심축 방향을 구하는 과정은 다음과 같다⁽³⁾.

곡면상의 곡률을 구하기 위하여 제1기본행렬 G와 제2기

본행렬 D를 구한다. 먼저 G는 식 (7), (8)을 이용하여 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} G &= \begin{bmatrix} \mathbf{r}_u \mathbf{r}_u & \mathbf{r}_u \mathbf{r}_v \\ \mathbf{r}_u \mathbf{r}_v & \mathbf{r}_v \mathbf{r}_v \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1+B_1^2 & B_1 B_2 \\ B_1 B_2 & 1+B_2^2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

다음 D는 다음과 같이 구해진다. 먼저 식 (7), (8)을 미분하면 다음과 같다.

$$\mathbf{r}_{uu} = 2a_1 \mathbf{k} \quad (13)$$

$$\mathbf{r}_{uv} = a_3 \mathbf{k} \quad (14)$$

$$\mathbf{r}_{vv} = 2a_2 \mathbf{k} \quad (15)$$

따라서 D는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} D &= \begin{bmatrix} \mathbf{r}_{uu} \cdot \mathbf{n} & \mathbf{r}_{uv} \cdot \mathbf{n} \\ \mathbf{r}_{vu} \cdot \mathbf{n} & \mathbf{r}_{vv} \cdot \mathbf{n} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{2a_1}{\sqrt{B_1^2 + B_2^2 + 1}} & \frac{a_3}{\sqrt{B_1^2 + B_2^2 + 1}} \\ \frac{a_3}{\sqrt{B_1^2 + B_2^2 + 1}} & \frac{2a_2}{\sqrt{B_1^2 + B_2^2 + 1}} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (16)$$

곡률은 앞의 기본 행렬들을 이용하여 다음과 같이 구해진다. 행렬 G, D의 요소들을 이용하여 다음을 정의한다.

$$a = g_{11} g_{22} - g_{12} g_{21}$$

$$b = (g_{11} d_{22} + g_{22} d_{11})/2 - g_{12} d_{12}$$

$$c = d_{11} d_{22} - d_{12} d_{21}$$

점 P를 지나는 많은 곡선들이 갖는 각각의 곡률들의 성분 중에서 법선 벡터 \mathbf{n} 방향의 최대값과 최소값을 각각 최대 법선 곡률은 x_{n1} 과 최소 법선 곡률 x_{n2} 라고 한다⁽³⁾. 이들 곡률은 앞의 행렬 G, D의 요소들을 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$x_{n1} = \frac{1}{a} (b + \sqrt{b^2 - ac}) \quad (17)$$

$$x_{n2} = \frac{1}{a} (b - \sqrt{b^2 - ac}) \quad (18)$$

다음은 최대 법선곡률을 갖는 곡면상의 곡선을 구한다.

이를 위하여 주법선곡률방향(principal direction) 즉 x_{n1} 또는 x_{n2} 의 곡률을 갖는 방향은 다음 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} h_{11}\dot{u} + h_{12}\dot{v} &= 0 \\ h_{21}\dot{u} + h_{22}\dot{v} &= 0 \end{aligned} \quad (19)$$

여기에서 $h_{11} = d_{11} - x_n g_{11}$, $h_{12} = d_{12} - x_n g_{12}$, $h_{21} = d_{21} - x_n g_{21}$, $h_{22} = d_{22} - x_n g_{22}$ 이다. 위의 식으로부터 $\dot{v} = -\frac{h_{11}}{h_{12}}\dot{u}$ 라고 하면, $v = -\frac{h_{11}}{h_{12}}u + c$ 가 되며, 매 개변수 (u_0, v_0)인 점을 지나는 곡선은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} v &= -\frac{h_{11}}{h_{12}}u + \frac{h_{11}}{h_{12}}u_0 + v_0 \\ &= qu + c \end{aligned} \quad (20)$$

여기에서, $q = -\frac{h_{11}}{h_{12}}$, $c = \frac{h_{11}}{h_{12}}u_0 + v_0$ 이다.

이로부터 곡면상의 주법선곡률 방향의 곡선은 매개변수 u 를 이용하여 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \mathbf{r} &= u\mathbf{i} + v\mathbf{j} \\ &\quad + (a_1u^2 + a_2v^2 + a_3uv \\ &\quad + a_4u + a_5v + a_6)\mathbf{k} \\ &= u\mathbf{i} + (qu + c)\mathbf{j} \\ &\quad + (a_1u^2 + a_2(qu + c)^2 + a_3u(qu + c) \\ &\quad + a_4u + a_5(qu + c) + a_6)\mathbf{k} \end{aligned} \quad (21)$$

따라서 주법선곡률 방향의 접선 벡터 \mathbf{t} 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{t} &= \mathbf{r}_u \\ &= \mathbf{i} + q\mathbf{j} \\ &\quad + \{2a_1u + 2a_2q(qu + c) + a_3(2qu + c) \\ &\quad + a_4 + a_5q\}\mathbf{k} \end{aligned} \quad (22)$$

위의 식 (19)에서 주법선곡률의 방향이 매개변수의 방향과 일치하는 2개의 특이 경우가 있다. 첫 번째 특이 경우는

$$h_{11} = 0, h_{12} = 0, h_{21} = 0, h_{22} \neq 0$$

인 경우로서 $v = \text{const.} = v_0$ 인 곡선, 즉 x_R 축과 평행한 방향이 주법선곡률 방향이며, 이때의 접선 벡터는

$$\mathbf{t} = \mathbf{r}_u \Big|_{\substack{u=u_0 \\ v=v_0}} = \mathbf{i} + \{2a_1u_0 + a_3v_0 + a_4\}\mathbf{k} \quad (23)$$

두 번째 특이 경우는

$$h_{11} \neq 0, h_{12} = 0, h_{21} = 0, h_{22} = 0$$

인 경우로서 $u = \text{const.} = u_0$ 인 곡선, 즉 y_R 축과 평행한 방향이 주법선곡률 방향이며, 이때의 접선 벡터는

$$\mathbf{t} = \mathbf{r}_v \Big|_{\substack{u=u_0 \\ v=v_0}} = \mathbf{j} + \{2a_2v_0 + a_3u_0 + a_5\}\mathbf{k} \quad (24)$$

따라서 특이 경우를 제외한 일반적인 경우에는 곡면상의 점 P에서 법선 벡터 \mathbf{n} 과 접선벡터 \mathbf{t} 와 직교하는 벡터 S가 파이프의 중심축의 방향이다. 즉

$$\mathbf{S} = \mathbf{n} \times \mathbf{t} \quad (25)$$

여기에서 중심축의 방향을 나타내는 각도는 다음 식으로 구해진다.

$$\alpha = \text{atan2}(S_x, S_y) \quad (26)$$

$$\beta = \text{atan2}(S_z, \sqrt{(S_x^2 + S_y^2)}) \quad (27)$$

또한 앞에서 언급한 특이 경우 즉 식 (23), (24)는 곡면 데이터를 2차식으로 맞추어 구한 계수를 이용하고 있기 때문에 오차를 갖고 있다. 따라서 이러한 오차를 방지하기 위하여 본 논문에서는 특이 경우에는 식 (26), (27)을 사용하지 않고 다음과 같이 처리한다. 즉 첫 번째 $v = \text{const.} = v_0$ 인 곡선이 주법선곡률 방향인 경우는 로봇의 y_R 방향이 관의 중심축의 방향 y_p 와 일치하는 경우이다. 따라서 $\alpha = 0^\circ$ 이다. 두 번째 특이 경우는 x_R 방향이 관의 중심축의 방향 y_p 와 일치하는 경우이다. 따라서 $\alpha = 90^\circ$ 이다.

3. 검사용 로봇

3.1 검사용 로봇 개요

Fig. 3과 같은 검사용 로봇은 크게 3부분으로 구성되어 있다⁽⁴⁾. 로봇의 선단부에는 다중 공구 모듈과 전방 검사용 카메라가 설치되어 있고, 중앙부는 로봇의 몸체로서 구동부분, 제어기등이 내장되어 있으며, 후미에는 Fig. 4와 같은 영상처리를 이용하여 거리를 측정하는 센서가 취부되어 있으며, 로봇의 중심축 주위로 회전하는 검사장치가 설치되어 있다.

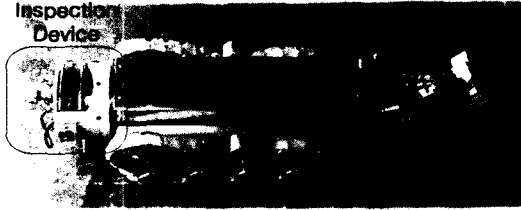


Fig. 3 Inspection robot for a sewage pipe

로봇 선단의 다중공구 모듈에는 지관 제거용 공구와 보수용 공구가 장착되어 있으며, 중앙부의 구동부는 전차에 사용되는 형태의 무한궤도 차륜을 사용하였다. 이로써 관 내부에 침전물이 있을 경우에도 안정된 운전이 가능하다. 관 내에 투입된 로봇은 관을 따라 이동하면서 시각장치를 이용하여 관의 상태를 연속적으로 촬영하며, 조사된 자료를 근거로 보수역할도 한다. 따라서 가장 중요한 것은 검사 작업 시 최대한 정밀한 데이터를 얻는 일이다. 그러나 관 내부가 어둡고, 조명을 사용하더라도 불완전하기 때문에 작업자가 파손부위를 지나칠 수 있으며, 정확한 크기를 알기가 어렵다. 따라서 검사용 로봇 후미에 거리 측정용 센서 장치를 설치하고, 로봇의 길이방향 중심축을 기준으로 회전시켜서, 관 내부의 3차원 거리 데이터를 모두 구한다^(5,6). 이를 토대로 작업자 및 관리용 소프트웨어에서 관의 상태를 분석한다.

3.2 3차원 좌표 측정용 센서

관 내부의 거리 영상을 획득하기 위한 센서는 Fig. 4와 같이 1대의 CCD 카메라와 이로부터 일정한 거리만큼 떨어져 있는 슬릿 빔 레이저발생기로 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^(5,6). 캘리브레이션은 공간의 실제 좌표계와 카메라의 영상좌표계간의 관계식을 구하는 것으로, 실제 공간상의 위치를 정확하게 알고 있는 다수의 점과 이에 대응하는 카메라 영상을 이용한다. 본 연구에서 사용하는 Fig. 4와 같은 레이저 슬릿빔을 사용하는 센서에서는 캘리브레이션 장치를 구성하여, 기준점으로부터 일정한 거리에 있는 평면에

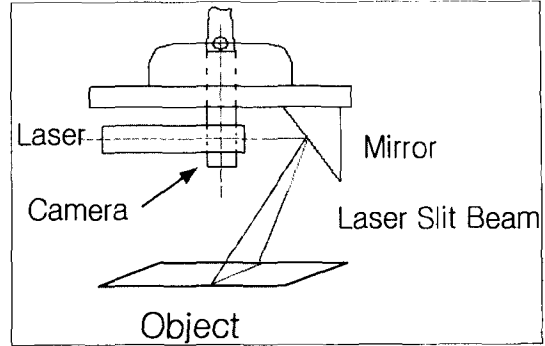


Fig. 4 Configuration of a range sensor

레이저 슬릿빔을 비추고, 이의 궤적에서 다수의 점을 지정하여 그 좌표 $(x, y, z)_s$ 를 기록한다. 이에 대응하는 영상 점들을 영상처리과정을 통하여 영상 좌표 (r, s) 를 구한다. 이들을 다음 식에 대입하여 관계 행렬을 구한다. 이렇게 구한 행렬은 다음 식 (28)과 같이 다시 쓸 수 있으며, m_{ij} 가 이 과정에서 구해진다.

$$\begin{bmatrix} s \times x_s \\ s \times y_s \\ s \times z_s \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} r \\ s \\ 1 \end{bmatrix} \quad (28)$$

이 과정을 거쳐서 구한 m_{ij} 행렬은 Table 1과 같으며, 이때 발생한 오차는 x축 -0.025~0.87mm, y축 0.111~0.78mm, z축 0.04~-2.35mm이다⁽⁵⁾.

레이저 거리 센서는 로봇의 후미에 부착되어 관의 벽면을 전체적으로 검사하기 위하여 로봇의 중심축을 기준으로 360° 회전한다. 이렇게 스캔하여 얻은 영상을 처리하고, 캘리브레이션 식 (28)을 적용하여 구한 센서를 기준으로 한 좌표는 다시 로봇을 기준으로 한 좌표로 변환한다. 센서 장치는 로봇의 길이 방향인 중심축을 기준으로 회전하고 있기 때문에 $(x, y, z)_s$ 와 $(x, y, z)_R$ 의 관계식은 Fig. 5를 참조하여 구하면 다음과 같다.

Table 1 Sensor matrix m_{ij} (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

$$\begin{aligned}
 -(z_s + l)\sin \theta - y_s \cos \theta &= x_R \\
 x_s &= y_R \\
 (z_s + l)\cos \theta - y_s \sin \theta &= z_R
 \end{aligned} \tag{29}$$

4. 자세 추정 결과

2절에서 유도된 방법의 가능성을 검증하기 위하여 시뮬레이션 데이터를 이용한 회전각도 추정 결과와 실험데이터에 적용한 결과를 구하였다. 모든 경우에 관의 직경은 실험 데이터의 경우와 같이 450mm이다.

4.1 시뮬레이션 결과

시뮬레이션의 경우는 잡음이 있을 경우와 잡음이 없을 경우에 대하여 수행하였으며, 결과는 Table 2, 3과 Fig. 6에 보였다. 본 논문에서는 잡음이 없는 경우는 잡음이 있는 경우와 같은 형상이므로 그림은 보이지 않았다. $\alpha = 20^\circ$, $\beta = 10^\circ$ 이며, 잡음이 없을 경우에 다항식 (2)의 계수는

$$A = [-0.0021 \ 0.0003 \ 0.0015 \ 0.0598 \ 0.1659 \ 228.5218]^T$$

이며, 이 때의 자세는 $\alpha = 19.98^\circ$, $\beta = 10.00^\circ$ 것으로 계산되었다. 또한 회전 각도의 변화에 대한 영향을 알아보기 위하여 회전각도 α 를 $5^\circ \sim 20^\circ$, β 를 $0^\circ \sim 20^\circ$ 이내에서 5° 간격으로 변화시키면서 2절에서 유도된 방법에 따라 식 (26), (27)을 이용하여 회전각도를 추정하였다. 잡음이 없는 경우 α 의 추정 오차는 Table 2에 보인 것과 같이 β 가 0° 인 경우는 α 의 추정오차는 없다. 그러나 β 가 증가하면 α 의 추정오차가 점점 증가한다. 또한 Table 3에 보인 β 의 추정 오차도 앞의 경우와 같은 경향을 갖으나, α 의 추정 오차보다 매우 작다. 두 가지 추정 오차 모두 0.04° 이하의 매우

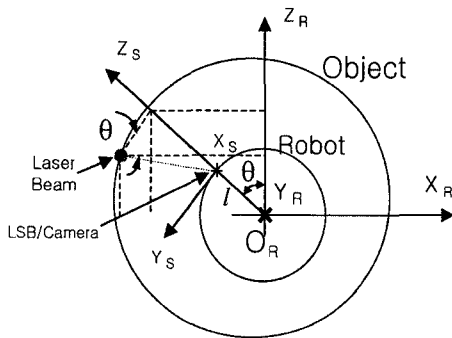


Fig. 5 Range sensor coordinate transform

Table 2 Rotation angle α estimation error in case of no noise

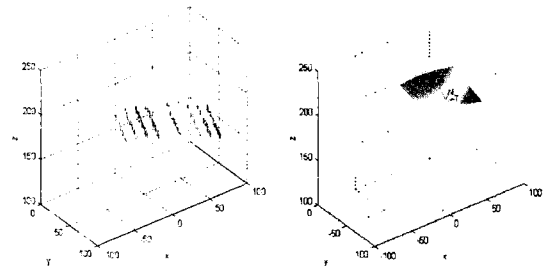
$\epsilon(\alpha)$		α (Deg.)			
		5	10	15	20
β (Deg.)	0	0	0	0	0
	5	0.0087	0.0087	0.0087	0.0087
	10	0.0178	0.0178	0.0178	0.0178
	20	0.0385	0.0385	0.0385	0.0385

Table 3 Rotation angle β estimation error in case of no noise

$\epsilon(\beta)$		α (Deg.)			
		5	10	15	20
β (Deg.)	0	0	0	0	0
	5	-0.0007	-0.0007	-0.0007	-0.0007
	10	-0.0015	-0.0015	-0.0015	-0.0015
	20	-0.0030	-0.0030	-0.0030	-0.0030

작은 오차를 보이고 있다. 이 오차는 주어진 수치 데이터를 곡면으로 맞추는 과정에서 사용된 다항식의 차수가 2 차이므로 발생한 것으로 보인다.

잡음이 있는 경우에도 앞의 경우와 같은 조건에서 시뮬레이션을 하여 중심축의 방향 벡터 S 와 회전각도 α , β 를 구하였다. Fig. 6은 $\alpha = 20^\circ$, $\beta = 10^\circ$ 인 경우로서 관의 직경은 450mm이다. Fig. 6 (a)에 보여준 좌표 값에는 실제 센서를 사용하였을 경우를 가정하여 x 방향에 2mm, z 방향에 5mm의 균일 분포를 갖는 백색 잡음을 첨가하였다. Fig. 6 (b)는 앞의 과정을 거쳐서 구한 벡터들과 맞춘된 곡면을 보여주고 있다. 잡음이 있을 경우는 랜덤 잡음을 부가



(a) 3D Range data from simulation (b) Fitted surface and the related vectors

Fig. 6 Computation result for the simulated data

Table 4 Mean and standard deviation of α in case of random noise added

$\bar{\alpha}$ (Deg.)		α (Deg.)			
$\sigma(\alpha)$ (Deg.)		5	10	15	20
β (Deg.)	0	5.3464 1.9496	10.3424 1.6592	14.9326 1.5904	19.7642 1.9578
	5	5.3796 2.0087	9.7593 1.4775	15.3802 1.8585	20.3623 1.6909
	10	5.5842 1.6360	10.3389 2.0471	14.6078 1.7024	19.7550 1.7473
	20	5.1035 1.5758	9.8791 1.5609	14.4803 1.8075	20.5189 1.8987

Table 5 Mean and standard deviation of β in case of random noise added

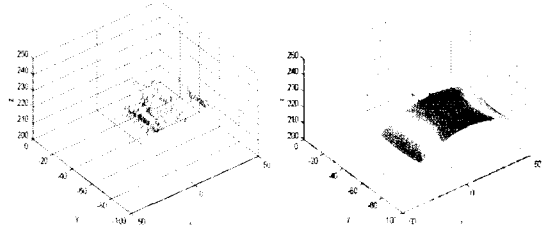
$\bar{\beta}$ (Deg.)		α (Deg.)			
$\sigma(\beta)$ (Deg.)		5	10	15	20
β (Deg.)	0	-0.0587 0.8428	0.0367 0.7449	-0.0281 0.6128	0.0456 0.5041
	5	4.9394 0.4371	5.0650 0.4805	5.1282 0.6112	5.0398 0.6083
	10	9.9974 1.2721	10.0844 1.4140	10.1952 1.2007	9.9337 1.4041
	20	19.9806 2.6776	20.0156 2.8704	20.1894 2.1758	20.2915 3.4555

하여 계산하므로 계산을 수행할 때마다 다른 결과를 주나, 하나의 예를 보이면, 다항식 (2)의 계수는

$$A = [-0.00192 \ 0.00033 \ 0.0015 \ 0.0658 \ 0.1517 \ 230.1825]^T$$

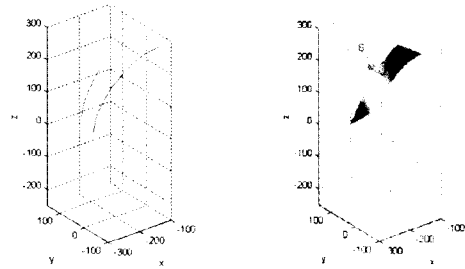
이며, 이때의 중심축의 각도는 $\alpha = 21.40^\circ$, $\beta = 9.74^\circ$ 로 계산되었다.

잡음이 있는 경우에 통계적으로 경향을 구하기 위하여 각각의 회전각도에서 50회씩 시뮬레이션을 하여 추정된 회전각도의 Table 4에 회전각도 α 의 평균과 표준편차를, Table 5에 β 의 평균과 표준편차를 보였다. Table 4를 보면, 회전각도 α 의 평균 오차는 모든 경우 0.6° 이내이며, 표준편차는 2.0° 이내이며, 회전각도에 따른 특별한 경향은 보이지 않는다. Table 5를 보면, 회전각도 β 의 평균 오차는 모든 경우 0.3° 이내이며, 표준편차는 α 의 변화에 따른 경향은 보이지 않으나, β 가 증가하면 표준편차도 증가하여 최대 3.5°



(a) Measured 3D range data (b) Fitted surface and the related vectors of real pipe

Fig. 7 Computation result for the measured data 1



(a) Measured 3D range data (b) Fitted surface and the related vectors of real pipe

Fig. 8 Computation result for the measured data 2

를 나타내고 있다.

4.2 실험 결과

Fig. 7 (a)은 참고문헌⁽⁵⁾의 데이터의 일부분으로 앞에서 언급한 거리 센서를 사용하여 얻은 데이터이다. 이때의 α 와 β 는 0° 이었다. 이를 이용하여 앞에서 기술한 과정을 거쳐서 구한 방향 벡터들을 Fig. 7 (b)에 보였다. 맞춤된 곡면의 다항식 (2)의 계수는

$$A = [-0.00699 \ 0.00367 \ 0.000798 \ 0.3037 \ 0.43669 \ 230.3747]^T$$

이며, 추정된 각도는 $\alpha = 1.95^\circ$, $\beta = 4.69^\circ$ 이다.

Fig. 8 (a)는 $\alpha = 20.0^\circ$, $\beta = 0^\circ$ 로 놓여 있는 물체에 대하여 측정된 것으로, 로봇의 중심축 방향으로 100mm 간격을 갖는 두 줄의 데이터를 보여주고 있다. Fig. 8 (b)는 곡면 맞춤을 하여 구한 법선 방향 벡터와 중심축의 방향을 보여주고 있다. 맞춤된 곡면 다항식의 계수는 다음과 같다. 이 경우의 맞춤된 곡면의 계수는 다음과 같다.

$$A = [-0.0059 \ 0 \ 0.0045 \ -1.1368 \ 0.2813 \ 169.6814]^T$$

또한 추정된 각도는 $\alpha = 19.45^\circ$, $\beta = -6.2^\circ$ 이다. 이 때는 오차가 많이 나왔는데, 데이터가 두 줄로 되어 정확한 맞춤이 되지 못한 것으로 보인다. 그러나 로봇을 안내하기 위해서는 좌우방향의 회전각도인 α 의 정확도가 중요하므로 실용적으로 적용할 수 있는 것으로 사료된다.

5. 결론

본 논문에서는 검사용로봇이 측정한 좌표 데이터를 꼭면 맞춤하고, 원기둥 형태의 대형 원형 관의 특성을 이용하여 센서를 장착한 로봇을 기준으로 관의 자세 즉 중심축의 방향을 나타내는 각도를 계산하는 방법을 개발하였다. 또한 시뮬레이션 데이터와 실험 데이터에 적용하여 방법의 타당성을 검증하였다.

데이터에 잡음이 없을 때는 추정된 각도가 0.04° 이내의 정확성을 보였다. 잡음이 있을 경우에도 회전각도 α 는 모든 경우 평균오차 0.6° 이내, 표준편차는 2.0° 이내이며, 회전각도에 따른 특별한 경향은 보이지 않으며, 회전각도 β 의 평균 오차는 모든 경우 0.3° 이내, 표준편차는 α 의 변화에 따른 경향은 보이지 않으나, β 가 증가하면 표준편차도 증가하여 최대 3.5° 즉 17.5% 를 나타내고 있다. 실험 데이터를 이용한 경우에도 α 는 2° 이내, β 는 6.5° 이내의 값으로

추정되었다.

위와 같은 결과로부터 로봇을 관내에 수행시킬 때 로봇을 안전하게 안내할 수 있는 것으로 보이며, 거리 측정용 센서의 정밀도를 향상시키면 원기둥 형상의 물체를 정확하게 측정하는데도 사용할 수 있는 것으로 사료된다.

참고 문헌

- (1) 주기세, “최소자승법을 이용한 가려지지 않은 원통형 물체의 자세 측정”, 한국정밀공학회지, 제15권, 제7호, pp. 167~174, 1998.
- (2) 채희창, “점 데이터를 이용한 3차원 형상의 구현을 위한 소프트웨어 개발”, 한국공작기계학회논문집, Vol. 11, No. 1, pp. 1~9, 2002.
- (3) I.D. Faux and M.J. Pratt, *Computational Geometry for Design and Manufacture*, Ellis Horwood, 1979.
- (4) 김성현, 윤지섭, 박병석, 조명위, 강이석, “하수관용 로봇의 검사 장치 설계제작”, 한국정밀공학회 추계학술대회논문집, pp. 681~684, 1998.
- (5) 이병술, 레이저 슬릿 빔을 이용한 관의 결함 검사 방법에 관한 연구, 충북대학교 교육대학원, 석사논문, 1999.
- (6) 정규원, 이병술, “하수관 검사용 로봇 시스템”, 충북대학교 산업과학기술연구소 논문집, Vol. 14, No. 1, pp. 107~111, 2000.