

원기동형 물체의 자세 인식 방법

정규원*

Posture Estimation Method for a Cylindrical Object

Jeong, Kyuwon*

Abstract

A cylindrical shape object is widely used as a mechanical part and a water pipe or an oil pipeline which are of cylindrical shape are widely used in the infrastructure. In order to handling such objects automatically using a robot, the posture i.e. orientation in 3D space should be recognized. However, since there is no edge or vertex in the pipe, it is very difficult task for the robot. In this paper in order to guide the robot, two kind of algorithms which find the axis using the measured range data from the robot to the object surface are to be developed. The algorithms are verified using both the simulated range data and the measured one.

Key Words: Robot (로봇), Cylindrical Object (원기동형 물체), Surface Fitting (곡면 맞춤), Principal Direction (주 곡률방향), Normal Curvature (법선 곡률), Normal Vector (법선벡터), Tangential Vector(접선벡터), Genetic Algorithm (유전자 알고리즘)

1. 서 론

각종 기계부품에 원기동형 부품이 많이 사용되고 있으며, 각종 기간시설 즉 상수도, 송유관, 하수도등에 대형 파이프가 많이 사용되고 있다. 이와 같은 물체를 다루기 위하여 로봇을 많이 사용하며, 이들 로봇은 자율적인 동작을 하는 것이 바람직하다. 그러나 이들 파이프 또는 원기동형 물체는 동작의 기준으로 사용할 수 있는 모서리 또는 꼭지점이 없기 때문에 로봇이 주행할 때 주행 방향을 유지하기 어렵다. 또한 원기동형 물체는 파이프뿐만 아니라 각종 기계부품으로 많이 사용되고 있으므로, 부품의 핸들링 또는 용접작업등에도 유용하게 적용될 수 있다. 본 논문에서는 참고문헌[1,2]에서 사용된 방법과 다르게, 측정된 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 구하는 방법과 유전자 알고리즘을 이용하여 더욱 간단한 계산을 통하여 중심축 방

향을 구하는 방법을 제시한다.

2. 자세 추정 방법

2.1 곡면맞춤을 이용한 방법

1) 이론

본 논문에서 사용된 거리 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 물체에 정의된 사용자 좌표계로 변환하여야 한다. 이때 로봇좌표계 원점 O_R 와 물체에 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 물체의 상대 위치도 알 수 있다. 그러나 본 논문에서는 로봇의 안전한 운행을 위한 물체의 방향을 구하는데 주안점을

* 충북대학교 기계공학부
정규원 (jeong@cbucc.chungbuk.ac.kr).

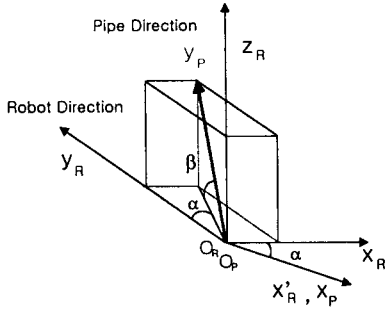


Fig.1 Reference Coord. for posture description

두도록 한다. Fig.1 에 보인 것과 같이 로봇의 중심에 좌표계 $O_R(x_R, y_R, z_R)$ 을 부여하고, 사용자가 정의한 물체의 좌표계 $O_P(x_P, y_P, z_P)$ 가 있으며, 물체의 중심축 방향이 y_P 와 일치하는 방향으로 하며, 이는 로봇의 방향 y_R 과는 z_R 을 중심축으로 $-\alpha$, y_R-x_R 평면 즉 x_R 축을 중심으로 β 만큼 회전된 방향에 있다고 가정한다. 먼저 로봇에 부착된 거리 측정용 센서를 사용하여 물체의 벽면의 점 $P(x_R, y_R, z_R)$ 를 구하고, 로봇에 부여된 기준점부터 물체 벽면의 한 점은 다음의 벡터로 표시된다.

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

거리 측정용 센서를 로봇의 중심축을 기준으로 회전시키면서 물체 벽면을 주사하여 다수의 점 ($m \times n$) 개의 좌표를 구하고, 이들을 곡면맞춤을 하여 곡면의 다항식을 구한다. 곡면맞춤에는 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.

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

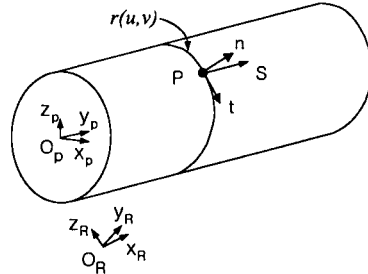


Fig.2 Principal direction and the related vectors

위의 식을 다시 간략하게 쓰면

$$\mathbf{X} \mathbf{A} = \mathbf{Z} \quad (4)$$

가 되며, 이 식에서 \mathbf{A} 는 의사 역행렬을 이용하여 다음과 같이 구해진다.

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

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

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

Fig.2 를 참조하여 곡면 \mathbf{r} 상의 한 점 P 에서 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

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

이며, 여기에서

$B_1 = 2a_1 u + a_3 v + a_4$, $B_2 = 2a_2 v + a_3 u + a_5$ 이다. 또 한 법선벡터의 크기는

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

따라서 점 P 에서 법선 벡터 \mathbf{n} 은

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

Fig.2 에서 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 참고문헌 [3,4]에 자세히 기술되어 있다.

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

$$\begin{aligned} \mathbf{r} &= u\mathbf{i} + v\mathbf{j} \\ &\quad + (a_1u^2 + a_2v^2 + a_3uv \\ &\quad + a_4u + a_5v + a_6) \mathbf{k} \\ &= u\mathbf{i} + (qu + c)\mathbf{j} \\ &\quad + (a_1u^2 + a_2(qu + c)^2 + a_3u(qu + c) \\ &\quad + a_4u + a_5(qu + c) + a_6) \mathbf{k} \end{aligned} \quad (12)$$

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

$$\begin{aligned} \mathbf{t} &= \mathbf{r}_u \\ &= \mathbf{i} + q\mathbf{j} \\ &\quad + \{2a_1u + 2a_2q(qu + c) + a_3(2qu + c) \\ &\quad + a_4 + a_5q\} \mathbf{k} \end{aligned} \quad (13)$$

따라서 특이 경우를 제외한 일반적인 경우에는 곡면상의 점 P 에서 법선 벡터 \mathbf{n} 과 접선벡터 \mathbf{t} 와 직교하는 벡터 S 가 물체의 중심축의 방향이다. 즉

$$S = \mathbf{n} \times \mathbf{t} \quad (14)$$

여기에서 중심축의 방향을 나타내는 각도는 다음 식으로 구해진다.

$$\alpha = \text{atan2}(S_x, S_y) \quad (15)$$

$$\beta = \text{atan2}(S_z, \sqrt{(S_x^2 + S_y^2)}) \quad (16)$$

2) 자세 추정 결과

앞에서 유도된 방법의 가능성을 검증하기 위하여 시뮬레이션 데이터를 이용한 회전각도 추정 결과를 구하였다. 모든 경우에 물체의 직경은 450 mm이다.

4.1) 시뮬레이션 결과

시뮬레이션의 경우는 잡음이 있을 경우와 잡음이 없을 경우에

대하여 수행하였으며, 결과는 Table 1, 2와 Fig.3에 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 5도 ~ 20도, β 를 0도 ~ 20도 이내에서 5도 간격으로 변화시키면서 앞에서 유도된 방법에 따라 식(15), (16)을 이용하여 회전각도를 추정하였다. 잡음이 없는 경우 α 의 추정 오차는 Table 1에 보인 것과 같이 β 가 0도인 경우는 α 의 추정 오차는 없다. 그러나 β 가 증가하면 α 의 추정 오차가 점점 증가한다. 또한 Table 2에 보인 β 의 추정 오차도 앞의 경우와 같은 경향을 갖으나, α 의 추정 오차보다 매우 작다. 두 가지 추정 오차 모두 0.04도 이하의 매우 작은 오차를 보이고 있다. 이 오차는 주어진 수치 데이터를 곡면으로 맞추는 과정에서 사용된 다항식의 차수가 2차이므로 발생

Table 1 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 2 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

한 것으로 보인다.

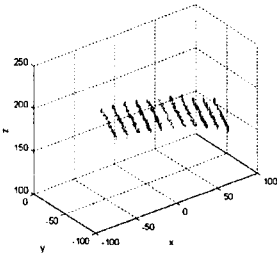
잡음이 있는 경우에도 앞의 경우와 같은 조건에서 시뮬레이션을 하여 중심축의 방향 벡터 S 와 회전각도 α , β 를 구하였다. Fig.3은 $\alpha = 20^\circ$, $\beta = 10^\circ$ 인 경우로서 물체의 직경은 450 mm이다. Fig.3(a)에 보여준 좌표 값에는 실제 선

서를 사용하였을 경우를 가정하여 x 방향에 2 mm, z 방향에 5 mm의 균일 분포를 갖는 백색 잡음을 첨가하였다. Fig.3 (b)는 앞의 과정을 거쳐서 구한 벡터들과 맞춘된 곡면을 보여주고 있다. 잡음이 있을 경우는 랜덤 잡음을 부가하여 계산하므로 계산을 수행할 때마다 다른 결과를 주나, 하나의 예를 보이면, 다항식 (2)의 계수는

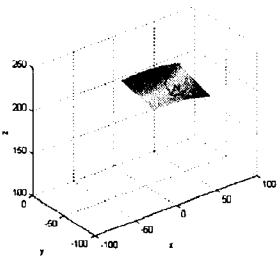
$$A = [-0.00192 \ 0.00033 \ 0.0015 \ 0.0658 \ 0.1517 \ 230.1825]^T$$

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 3에 회전각도 α 의 평균과 표준편차를, Table 4에 β 의 평균과 표준편차를 보였다. Table 3을 보면, 회전각도 α 의 평균 오차는 모든 경우 0.6도 이내이며, 표준편차는 2.0도 이내이며, 회전각도에 따른 특별한 경향은 보이지 않는다.



(a) 3D Range data from simulation



(b) Fitted surface and the related vectors
Fig.3 Computation result for the simulated data

Table 4를 보면, 회전각도 β 의 평균 오차는 모든 경우 0.3도 이내이며, 표준편차는 α 의 변화에 따른 경향은 보이지 않으나, β 가 증가하면 표준편차도 증가하여 최대 3.5도를 나타내고 있다.

Table 3 Mean and standard deviation of α in case of random noise added

$\bar{\alpha}$ (Deg.)		α (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 4 Mean and standard deviation of β in case of random noise added

$\bar{\beta}$ (Deg.)		α (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

2.2 유전자 알고리즘을 이용한 방법

1) 이론

앞에서 언급한 바와 같이 거리 데이터를 곡면으로 맞추어 관의 형상인 원기둥 곡면을 얻고 이를 이용하여 관의 방향을 구하는 방법을 사용할 수 있다. 그러나 이 방법은 곡선맞춤을 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.4에 보인 것과 같다.

물체의 방향은 Fig.1과 같이 α 와 β 의 각도로 주어졌다고 가정하고, 임의의 α 와 β 를 선정한다. 이 선정과정은 유전자 알고리즘의 일부분으로 확률변수를 사용하여 주어진 포폴레이션을 이용한다. 앞에서 언급한 거리데이터를 α 와 β 의 각도를 이용하여 좌표변환한다.

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

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

$[x \ y \ z]_P^T$ 는 가정된 물체를 기준으로 계산된 물체 벽면의 좌표이다. 따라서 이들은 물체의 중심축인 Z_p 방향에서 보았을 때 물체의 직경을 갖는 원주상에 있어야 한다. 변환된 좌표축이 물체의 중심축과 일치하지 않으면 이들은 원주상에 있지 않고 흐트러지게 되며 반지름과 차이를 주게 된다. 따라서 이를 이용하여 주어진 데이터들이 모두 원주상에 있을 때까지 회전각도를 변화시킨다. 회전각도를 새로 선정할 때 유전자 알고리즘을 이용하여 새로운 세대의 포플레이션을 생성한다. 여기에는 크로스오버, 돌연변이, 엘리트주의 방법을 사용하고, 엘리트리즘도 적용한다[5].

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

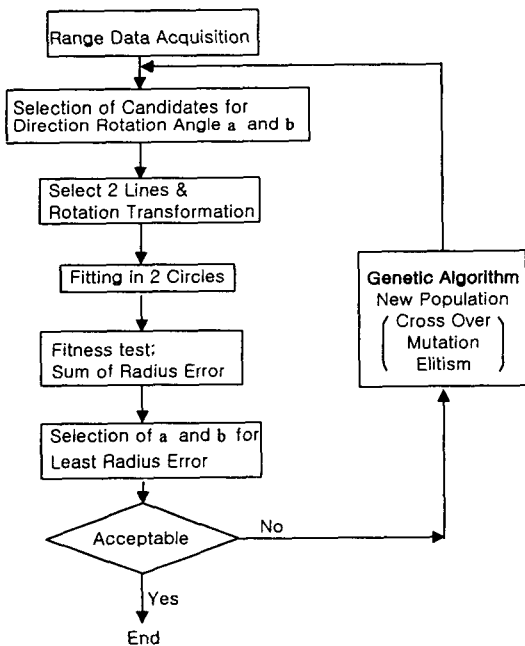


Fig.4 Procedure for steering angle determination

2) 시뮬레이션 결과

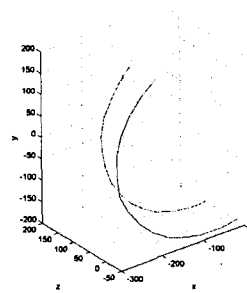


Fig. 5 The range data from the mobile robot to the pipe surface

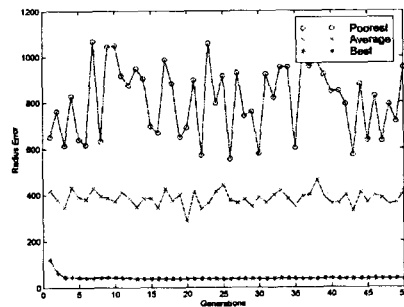


Fig.6 Fitness (radius error) variation with the population generation

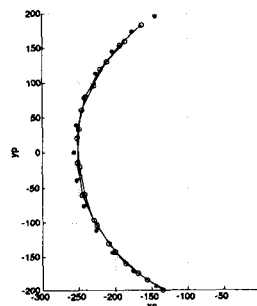


Fig.7 The aligned range data to the pipe axis

Fig.5 는 이동로봇에 장착되어 있는 LSB/Camera 거리센서를 이용하여 얻은 물체의 벽면의 거리데이터이다. Fig.6 은 유전알고리즘에 의하여 회전각도 α 와 β 를 변화시킬 때 세대

변천에 따른 반경오차를 보여주고 있다. 15세대 정도에서 수렴하고 있는 것을 보여주고 있다. Fig.7 은 최종적으로 얻은 회전각도를 이용하여 Fig.5의 데이터를 좌표변환 했을 때 Zp 방향에서 본 데이터의 분포이다. 이로써 이때의 α 와 β 값이 로봇에 상대적인 물체의 방향임을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 검사용 로봇이 측정된 좌표 데이터를 이용하여 물체의 자세를 인식하는 방법을 개발하였다. 첫째 방법은 좌표 데이터를 곡면 맞춤하여 주법선곡물의 방향을 구하여 물체의 자세를 추정하는 방법이며, 두 번째는 곡면맞춤 단계를 생략하여 간단한 계산을 통하여 자세를 추정할 수 있는 방법으로서 회전각도 선정을 유전자 알고리즘을 이용하여 확률적으로 선택하여 물체의 자세를 추정한다. 두 가지 방법 모두 실용적으로 사용될 수 있는 결과를 보였다.

참 고 문 헌

- (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, 11권, 1호, pp.1-9, 2002.
- (3) I. D. Faux and M. J. Pratt, *Computational Geometry for Design and Manufacture*, Ellis Horwood, 1979.
- (4) 정규원, "검사용 로봇을 위한 원기둥형 물체의 자세 추정 방법", 한국공작기계학회논문집, 12권, 1호, pp.8-15, 2003.
- (5) J. S. R. Jang, C. T. Sun and E. Mizutani, *Neuro-Fuzzy and Soft Computing*, Prentice Hall, 1997.