

금형 개조 용접시 대상물 위치 파악에 관한 연구

A Study on Measurement of Die Location for Its Remodeling

김지태, 나석주

한국과학기술원 기계공학과, 대전광역시

1. 서 론

단조 공정에 이용되는 금형은 제작비가 많이 드는데다가 소비자의 빠른 요구 변화 및 설계 변경 등으로 인해, 이미 제작된 금형에 대해 설계 변경이나 파손부위의 수리를 위해서 재가공 하는 시도가 이루어지고 있다. 즉, 완성된 금형을 재절삭을 통해 새로 설계된 금형으로 개조를 하게 되는데, 절삭 면적이 너무 크거나 파손 부위의 수리를 할 때에는, 미리 용융 금속을 적층한 후에 절삭 가공을 하는 것이 전체 공정시간을 줄이는데 큰 효과가 있다. 따라서, 금형 개조용 시스템의 자동화를 위해서는 용융 금속을 적층하는 전략(strategy)을 마련하고, 이것으로부터 계획된 용접 경로를 생성한 후에, 용접 로봇에 대한 금형의 상대적인 위치를 파악하여 계획된 용접 경로를 보장해 주는 시스템이 필요하다. 일반적으로 로봇을 이용한 자동용접을 위한 대상물 파악에 관한 연구는 많이 진행되어 왔으나, 이를 금형에 적용하기에는 어려움이 따른다. 본 논문에서는 시각센서를 이용하여 금형의 위치를 파악할 수 있는 알고리즘을 제시하고, 모의실험을 통해 검증하였다.

2. 본 론

대상물위 위치를 파악한다는 것은 대상물의 계획된 위치와 현재 위치사이의 변환행렬(transformation matrix)를 구하는 것이다. 일반적으로 변환행렬은 대응되는 세 점의 좌표를 가지고 계산 할 수 있다. 하지만, 금형에 있어서는 대응되는 점을 찾기가 힘들뿐 아니라, 매번 변하는 금형면에 대해서 특징점을 찾는 것은 효율적이지 못하다. 따라서 본 연구에서는 대응점 없이 선벡터 방정식과 면벡터 방정식을 이용하여 변환행렬을 구하는 방법을 고안하였다.

A. 선벡터 방정식을 이용한 변환행렬 구하기

일반적으로 강체 변환 행렬(rigid body transformation matrix)은 회전 행렬(R, rotation matrix) 부분과 병진 행렬(P, translation matrix) 부분을 분리한 (4× 4)의 동차변환행렬(homogeneous matrix)로 표시할 수 있다. 이렇게 동차변환행렬을 사용하면 회전 행렬의 역행렬은 전치(transpose)행렬과 같아서 계산이 편리해지는 이점이 있다.

이 때 회전 행렬 부분은 여러 가지 형태로 표시할 수 있으나, 본 연구에서는 식(10)과 같은 등가축회전(equivalent angle-axis) 방법을 사용하였다. 단위 벡터인 k 는 원점을 중심으로 한 회전축을 나타내며 k_x, k_y, k_z 는 각 방향 원소들이다.

$$R(k, \theta) = \begin{bmatrix} k_x k_x v + c & k_y k_x v - k_z s & k_z k_x v + k_y s \\ k_x k_y v + k_z s & k_y k_y v + c & k_z k_y v - k_x s \\ k_x k_z v - k_y s & k_y k_z v + k_x s & k_z k_z v + c \end{bmatrix}$$

$$s = \sin \theta, \quad c = \cos \theta, \quad \text{and} \quad v = 1 - \cos \theta$$

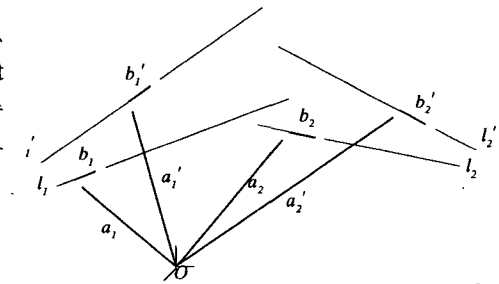


Fig.1 Two pairs of matched 3d lines

Fig.1과 같이 평행하지 않은 두 개의 직선 l_1, l_2 에 대하여, 이에 대응하는 측정된 벡터 방정식 l_1', l_2' 을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$l_1: \vec{x} = \vec{a}_1 + t\vec{b}_1, \quad l_2: \vec{x} = \vec{a}_2 + t\vec{b}_2, \quad l_1': \vec{x} = \vec{a}_1' + t\vec{b}_1', \quad l_2': \vec{x} = \vec{a}_2' + t\vec{b}_2'$$

이 때 회전축 k 는 각 대응하는 방향 벡터를 수직 이등분하는 평면 위에 존재하게 되므로 Fig.2와 같이 L_1 평면과 L_2 평면이 만나는 선이 회전축 방향이 된다. L_1, L_2 평면의 법선 벡터를 각각 \vec{L}_1, \vec{L}_2 라 하면, 이들은 다음과 같이 직선의 방향 벡터 쌍으로부터 계산할 수 있으며, 회전축 k 는 이들 벡터의 외적이 된다.

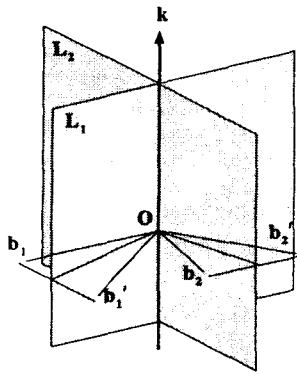


Fig.2 Axis of revolution

$$\vec{L1} = (\vec{b}_1 + \vec{b}_1') \times (\vec{b}_1 \times \vec{b}_1'), \vec{L2} = (\vec{b}_2 + \vec{b}_2') \times (\vec{b}_2 \times \vec{b}_2'), \vec{k} = \vec{L1} \times \vec{L2}$$

이 때 오른손 부호 관습(sign convention)에 따르기 위해 $(\vec{b}_1 \times \vec{b}_1') \cdot \vec{k}$ 값을 계산하여, 음의 값을 가질 경우 회전축 k 의 각 원소들의 부호를 반대로 해주었다. 이렇게 회전축 k 를 결정하고 나면 회전각도 θ 는 k 를 법선 벡터로 갖는 평면에 각 방향 벡터를 투영(projection)시킨 벡터 사이의 각과 같으므로, 각 방향 벡터 쌍에 대해서 다음과 같이 계산 할 수 있다.

$$\theta_1 = \cos^{-1}[\{\vec{b}_1 - (\vec{b}_1 \cdot \vec{k})\vec{k}\} \cdot \{\vec{b}_1' - (\vec{b}_1' \cdot \vec{k})\vec{k}\}],$$

$$\theta_2 = \cos^{-1}[\{\vec{b}_2 - (\vec{b}_2 \cdot \vec{k})\vec{k}\} \cdot \{\vec{b}_2' - (\vec{b}_2' \cdot \vec{k})\vec{k}\}]$$

위와 같이 회전축과 회전각을 계산하여 회전 행렬을 구하게 되면 짝이 되는 선 벡터 방정식들은 Fig.3과와 같이 평행하게 놓이게 된다. 이후에 병진 행렬을 구할 때는, 다음 식과 같이 첫 번째 벡터 방정식을 일치시킨 후에, 첫 번째 벡터 방정식의 방향 벡터와 같은 방향의 병진 행렬 P2 로 두 번째 벡터를 일치시키는 방법으로 구할 수 있다.

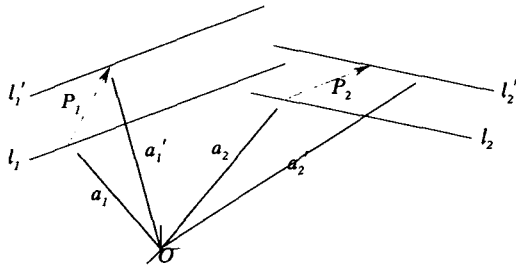


Fig.3 Translation matrix for 2 matched line pairs

$$\vec{P}_1 = \vec{a}_1' - [R]\vec{a}_1, \vec{P}_2 = m[R]\vec{b}_1, \vec{P} = \vec{P}_1 + \vec{P}_2$$

여기서, 강체 구속 조건(rigidity constraint)을 만족시킨다면 $\vec{a}_2' - \vec{P}_1 - \vec{P}_2$ 는 l2 상에 존재해야 하므로 다음과 같이 정리되고, 이를 선형 방정식으로 쓸 수 있다.

$$\vec{a}_2' - \vec{P}_1 - m\vec{b}_1' = \vec{b}_2't + [R]\vec{a}_2$$

$$[\vec{b}_1' \quad \vec{b}_2'] \begin{bmatrix} m \\ t \end{bmatrix} = \vec{a}_2' - \vec{P}_1 - [R]\vec{a}_2$$

따라서 대상물의 있는 두 개의 직선에 대해 벡터 방정식을 알고 있을 때, 이 두 개의 선에 대한 실제 측정을 통해 대상물의 이동된 정도를 나타내는 변환 행렬(transformation matrix)을 구할 수 있다. 단, 두 개의 직선이 평행할 경우 6자유도를 표현할 수 없으므로 본 알고리즘을 적용할 때에는, 대상물에서 평행하지 않은 두 개 이상의 직선을 찾아야 한다

B. 면벡터 방정식을 이용한 변환행렬 구하기

평면의 벡터 방정식을 이용하여 위치 검출을 할 경우, 회전 변환을 계산하는데는 두 개 이상, 병진 변환을 계산하는데는 세 개 이상의 대응된 평면 쌍이 필요하다. 평행하지 않은 세 개의 평면 벡터 방정식 p1, p2, p3 에 대하여, 이에 대응하는 측정된 벡터 방정식 p1', p2', p3' 을 다음과 같이 표시할 때,

$$p_1 : \vec{v}_1 \cdot \vec{x} + d_1 = 0, p_2 : \vec{v}_2 \cdot \vec{x} + d_2 = 0, p_3 : \vec{v}_3 \cdot \vec{x} + d_3 = 0$$

$$p_1' : \vec{v}_1' \cdot \vec{x} + d_1' = 0, p_2' : \vec{v}_2' \cdot \vec{x} + d_2' = 0, p_3' : \vec{v}_3' \cdot \vec{x} + d_3' = 0$$

평면의 법선 벡터 쌍 (\vec{v}_i, \vec{v}_i') 으로부터 선 벡터 방정식에서와 같은 방법으로 회전축 k 와 회전 각도 θ 를 구할 수 있다.

그 다음에, 회전 행렬을 통해 평행하게 놓여진 세 개의 평면 쌍들로부터 다음과 같은 방법으로 병진 변환 행렬을 구할 수 있다. 첫 번째 평면으로부터 평면의 법선 방향인 P1 병진 행렬로 평면을 일치시킨 후, 두 번째 평면은 첫 번째 평면 내에서 가장 가까운 방향인 $\vec{v}_1' \times (\vec{v}_2' \times \vec{v}_1')$ 방향으로 이동시켜서 두 평면이 일치되도록 P2 병진 행렬을 구한다.

$$\vec{P}_1 = (d_1' - d_1)\vec{v}_1' \quad d_2'' = d_2' - \vec{v}_2' \cdot \vec{P}_1 \quad \vec{P}_2 = m\vec{v}_1' \times (\vec{v}_2' \times \vec{v}_1') \quad \vec{v}_2' \cdot \vec{P}_2 + d_2 = d_2''$$

$$m = \frac{(d_2'' - d_2)}{[\vec{v}_1' \times (\vec{v}_2' \times \vec{v}_1')] \cdot \vec{v}_2'}$$

계속해서 P3 병진 행렬을 $(\vec{v}_1' \times \vec{v}_2')$ 방향으로 세 번째 평면이 일치되도록 다음과 같이 구할 수 있다.

$$d_3'' = d_3' - \vec{v}_3' \cdot \vec{P}_1 - \vec{v}_3' \cdot \vec{P}_2 \quad \vec{P}_3 = n(\vec{v}_1' \times \vec{v}_2') \quad \vec{v}_3' \cdot \vec{P}_3 + d_3 = d_3'' \quad n = \frac{(d_3'' - d_3)}{(\vec{v}_1' \times \vec{v}_2') \cdot \vec{v}_3'}$$

최종적인 병진행렬은 다음과 같이 P1, P2, P3 의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\vec{P} = \vec{P}_1 + \vec{P}_2 + \vec{P}_3$$

3. 실험결과

위에 제시한 알고리즘을 검증하기 위해 실제 금형에 대한 모사 실험으로 2mm 두께의 스테인레스 강판을 구부려서 측정 시편을 제작한 후 3축 직교 좌표 로봇에 시각센서를 부착하여 측정 실험을 하였다. 먼저 초기 위치에 대해 측정을 수행하고, 시편을 회전시키거나 병진이동시킨 후 측정을 하여, 초기 위치에 대한 이동 정도를 본 논문의 위치 검출 알고리즘을 통해 계산하였다.

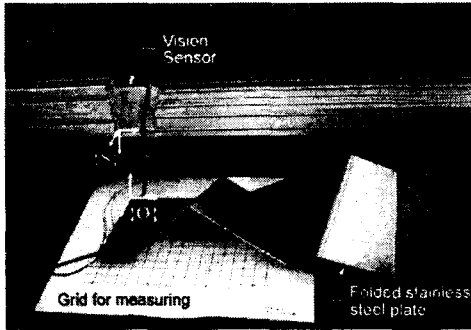
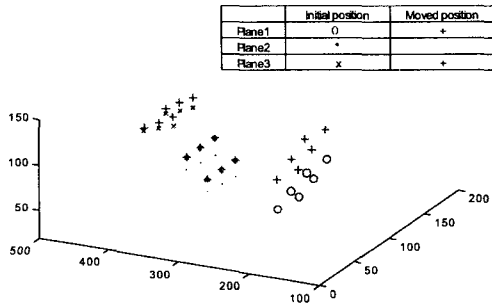


Fig.4 Experimental setup for measuring of folded stainless steel plate

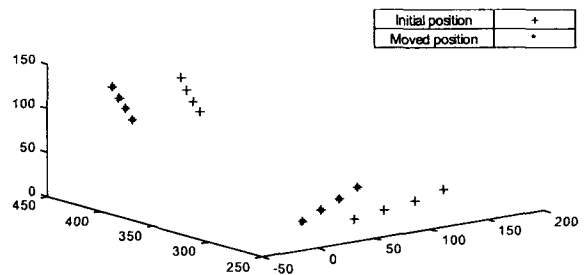
Fig.5은 세 개의 평면을 이용해 위치 검출을 한 결과이고, Fig.6는 두 개의 직선을 이용한 위치 검출 결과이다. 실제 금형은 평면에 대한 틸팅이 매우 작으므로 회전축 k 는 $[0 \ 0 \ 1]$ 을 사용하였다.

각각의 경우에 대해 회전축과 회전각도, 병진이동 벡터를 계산 하였고, 회전 각도는 대상물의 원점에 대한 위치에 따라 차이를 보이므로 길이 1m짜리 대상물을 가정하고, 끝단에서 회전 각도오차에 의한 거리오차가 얼마나 커지는 가를 계산해 보았다. 용접을 할 경우 비드폭은 약 1mm 내외에서 허용오차를 가지므로, 실제 용접을 할 경우 문제가 되지 않는 오차 내에서 결과를 얻을 수 있었다.



$k = [-0.0071 \ -0.0118 \ 0.9975]$
 $\theta = 9.9409^\circ$
 $P = [13.9976mm \ 8.7570mm \ 4.5129mm]$
 Error after 1m length = 1.0314mm

Fig.5 Result of experiment using planes



$k = [-0.0278 \ -0.0170 \ 0.9995]$
 $\theta = 10.0862^\circ$
 $P = [14.8292 \ 9.7902 \ 0.4355]$
 Error after 1m length = 1.5045mm

Fig.6 Result of experiment using lines

Reference

1. M.Oshima and Y.Shirai, "Object recognition using three-dimensional information," IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., Vol. 3, No. 4, pp. 353-361, July 1983.
2. O.D.Faugeras and M.Hebert, "The representation recognition and locating of 3-D objects," Int. J. Robotics Res., Vol .5, No. 3, pp. 27-52, Fall 1986.
3. B.Bhanu, "Representation and shape matching of 3-D objects," IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., Vol. PAMI-6, No. 3, pp. 340-350, May 1984.
4. Tin-Jun Fan, "Recognition 3-D objects using surface descriptions," IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., Vol. 11, No. 11, pp. 1140-1157, November 1989.