

금형 개조 용접시 시각 센서를 이용한 대상물 위치 파악에 관한 연구

김지태*, 나석주**

A Study on Vision Sensor-based Measurement of Die Location for Its Remodeling

Jitae Kim*, Suck-Joo Na**

ABSTRACT

We introduce the algorithms of 3-D position estimation using a laser vision sensor for automatic die remodeling. First, a vision sensor based on the optical triangulation was used to collect the range data of die surfaces. Second, line vector equations were constructed by the measured range data, and an analytic algorithm was proposed for recognizing the die location with these vector equations. This algorithm could make the transformation matrix without any specific corresponding points. To ascertain this algorithm, folded SUS plate was measured by the laser vision sensor attached to a 3-axis cartesian manipulator and the transformation matrix was calculated.

Key Words : Position estimation (자세측정), Vision sensor (시각센서), Transformation matrix (변환행렬)

1. 서론

단조 공정에 이용되는 금형은 제작비가 많이 드는데다가 소비자의 빠른 요구 변화 및 설계 변경 등으로인해, 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, 절삭면적이 너무 크거나 파손 부위의 수리를 할 때에는, 미리 용융 금속을 적층한 후에 절삭 가공을 하는 것이 전체 공정시간을 줄이는데 큰 효과가 있다. 하지만 금형 변경에 이루어지는 용융 금속의 적층은 전적으로 수작업으로 이루어지고 있어서,

적층의 정밀성이나 적층부의 품질 등을 보장할 수 있는 방법이 없는 상황이다. 따라서 용융 금속의 적층을 자동화하려는 시도가 이루어지고 있으나, 대상물인 금형이 상당히 크고 무거운데다가 작업대상물이 매번 바뀌는 관계로 자동화 수립에 어려움이 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 보정해 주는 시스템이 필요하다.

본 연구에서는 시각센서를 이용해 금형의 거리

* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

** 한국과학기술원 기계공학과

정보를 얻고, 이를 통해 금형의 상대적인 위치를 파악하는 알고리즘을 제안하려고 한다. 3차원 공간상의 거리정보(range data)로 물체의 위치를 파악하는 것은 실제 현장에서 로봇 자동화를 실현시킬 때 꼭 해결해야하는 문제이며, 현재 많은 연구가 진행되어왔다. Ohsima and Shirai는 원통과 다면체로 구성된 대상물을 인식하는데 있어서, 추출된 거리정보로 면을 구성한 후, 각 면의 특징으로 구성된 목적함수를 최소화 하는 대응을 찾아내는 방법을 사용하였다⁽¹⁾. Faugeras and Hebert는 물체 인식 문제를 사원수를 이용한 최소화문제로 바꾸어 대응된 점, 선, 평면들을 이용해 변환 행렬을 구하는 방법을 제시하였다⁽²⁾. Bhanu는 물체의 거리정보를 근사시킨 평면으로 구성하여 대응된 평면들의 무게중심을 이용하여 (3×3)의 변환행렬을 구하였다⁽³⁾.

3차원 공간상에서 물체의 위치 및 자세 보정을 금형면에 적용하는데 있어서 문제점은 특징이 되는 점 데이터를 얻기 어려운 데 있다. 대부분의 금형면에는 코너가 존재하지 않으며, 금형 몸체를 이루고 있는 구조물에서는 코너가 존재하나 가공 정밀도를 보장할 수 없으므로 특징점으로 사용하기는 어렵다. 또한 표식(marking)을 부착하고 이를 측정할 경우, 절차가 번거롭고 정밀도를 보장할 수 없게된다. 따라서 금형의 위치 및 자세를 보정하기 위해서는 특징점의 대응관계가 필요없는 알고리즘이 필요하다.

본 연구에서는 금형 보수용 용접 자동화 시스템을 구현하는데 있어서, 시각센서의 측정 결과를 이용해 로봇에 대한 금형의 초기 위치와 자세를 대응점 없이 인식하여 현재의 위치를 보정할 수 있는 알고리즘을 제안하려 한다.

2. 시각센서

2.1 개요

본 연구에서 사용되는 시각센서의 측정 원리는 구조화된 빔을 이용한 광삼각법^(6,7)에 의해 물체의 거리정보를 얻을 수 있는 것으로, 측정 범위가 약 90mm×40mm 정도 되도록 설계를 하였다. 이 때, 깊이 방향 분해능은 약 0.2mm, 측면 방향 분해능은 약 0.05mm 정도이다. 사용된 다이오드 레이저는 파장이 690nm인 적색 광원으로 원통형 렌즈를 통과시켜 평면 형태로 조사되도록 하였다. 설계에 의해서 제작된 시각센서의 모양은 Fig.1과 같다.

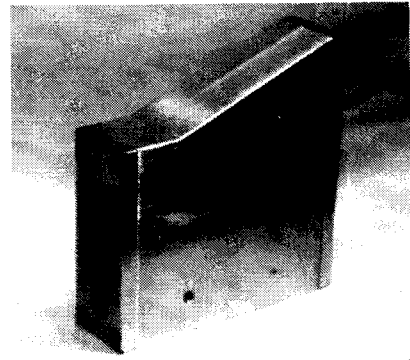


Fig. 1 Vision sensor of structured light

2.2 교정

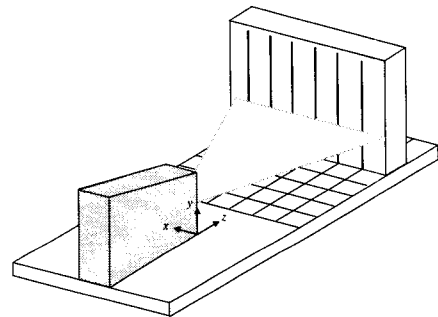


Fig. 2 Calibration method

교정은 3차원 공간상의 임의의 좌표와 카메라의 센서에 해당하는 2차원 영상 좌표 사이의 대응관계를 구하는 것을 말한다. 교정을 하기 위해서는 3차원 공간상의 한 점의 좌표값을 정확히 알고, 그에 대응되는 영상 좌표상의 값을 정확히 알아야 하며, 이와 같은 데이터가 4점 이상 얻어져야 한다⁽⁶⁾. 본 연구에서는 전 측정 영역에서 고르게 좌표값을 얻기 위해 Fig.2와 같이, 1cm 간격으로 수직으로 검은 선이 그려진 교정 표적지(calibration target)를 사용하여 CCD 카메라에서부터 6cm 떨어진 지점에서부터 11cm 떨어진 지점까지 1cm 간격으로 좌표값을 얻었다.

2.3 영상처리 알고리즘⁽⁶⁾

레이저 띠가 조사된 대상물을 CCD 카메라로 보게되면, 레이저 띠가 여러 픽셀에 걸쳐 나타나게

된다. 따라서 레이저가 조사된 대상물의 위치를 얻고, 교정행렬을 통해 3차원 거리 정보를 얻기 위해서는 영상처리 과정을 거쳐야 한다.

우선 영상 신호를 256단계의 그레이 레벨(gray level)로 이산화시킨 후, 레이저 띠의 두께에 해당하는 칼럼 윈도우를 만들어 영상처리를 하는 영역 내에서 한 픽셀씩 이동시키며 윈도우 내의 픽셀값을 적산한다. 이때 적산값이 최대가 되는 윈도우의 중심이 레이저 띠의 중심이라고 결정하였다. 본 논문에서는 실제로 획득된 영상에 대하여 레이저 띠의 평균값을 계산하여 칼럼 윈도우의 크기를 결정하였다.

이렇게 레이저 띠가 조사되는 점들의 영상 좌표값을 얻은 후에는 모서리의 좌표값을 얻기 위하여 영상 좌표들을 직선으로 선형 보간하고, 두 개의 보간된 직선이 만나는 점을 계산하였다. 이 때, 계산을 간략하게 하기 위해 모든 점을 사용하지 않고, 20개 픽셀마다 레이저 띠의 중심을 추출하였다.

3. 위치 검출 알고리즘

대상물의 위치를 검출하는 방법으로 가장 손쉬운 방법은 대응되는 점 3개로부터 (3×3) 변환행렬을 구하는 것이다. 하지만 금형면에 있어서 특징되는 점을 선정하기는 매우 어려우며, 매번 달라지는 금형에 대해서 특징점을 찾아내는 것은 자동화란 관점에서 불합리해 보인다. 따라서 Bhanu나 Fan 등은 대응되는 평면의 무게중심(centroid)을 이용하여 변환행렬을 구하는 방법을 제안하였으나^(3,4), 이 방법을 금형에 적용시키기에는 면의 경계를 측정하기가 어렵고, 또한 면 전체를 측정해야 하므로 정밀성과 효율성이 떨어진다.

따라서 본 연구에서는 대응되는 점을 이용하지 않고, 선의 벡터 방정식과 평면의 벡터 방정식으로부터 직접 변환행렬을 구하는 방법을 제안하였다.

3.1 점좌표를 이용한 3차원 모델링

Fig.3과 같이 3차원 직선의 방정식은 일반적으로 식(1)과 같이 표시할 수 있고, 이를 벡터 방정식으로 표시하면 식(2)와 같다.

$$\frac{x-a_1}{b_1} = \frac{y-a_2}{b_2} = \frac{z-a_3}{b_3} \quad (1)$$

$$\vec{x} = \vec{a} + t\vec{b} \quad (2)$$

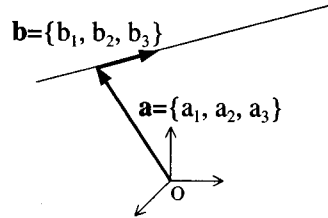


Fig. 3 3D line of vector form

여기서 \vec{a} 는 직선이 지나는 위치벡터이며, \vec{b} 는 직선의 방향벡터이다. 2차원 평면에서 점들을 가지고 직선 보간 하는 방법은 최소 자승 오차법 (least-square fitting)으로 구할 수 있으나, 식(2)와 같은 매개변수 벡터 방정식일 경우에는 이와 같은 방법으로 구할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 3차원의 점들로부터 위치 벡터와 방향벡터를 평균하는 방법으로 3차원 직선의 방정식을 유도하였다.

공간상에 점들이 있을 때, 각 점의 위치벡터를 \vec{a}_i 라고 하면 각 위치벡터들의 차이 $\vec{a}_i - \vec{a}_{i-1}$ 가 방향벡터 \vec{b}_i 가 된다. 이 때 이들 점들이 이루는 직선의 방정식을 식(3)과 같이, 단위벡터화한 방향벡터들의 평균과 위치벡터들의 평균으로 구성하였다.

$$\vec{b} = \frac{\sum \vec{b}_i / \|\vec{b}_i\|}{n}, \quad \vec{a} = \frac{\sum \vec{a}_i}{n} \quad (3)$$

3차원 공간에서의 평면의 방정식은 식(4)와 같으며, 이를 벡터로 표시하면 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$v_1x + v_2y + v_3z - d = 0 \quad (4)$$

$$\vec{x} \cdot \vec{v} - d = 0 \quad (5)$$

여기서 \vec{v} 는 평면의 법선 벡터(normal vector)이며, 법선 벡터가 단위 벡터일 경우 d 는 원점에서부터의 거리가 된다. 3차원 공간상의 점들로부터 평면의 방정식을 유도할 경우 오차를 식(6)과 같이 정의한다면, 식(7)과 같이 최소 자승 오차법을 적용할 수 있어 식(8)에 의해 계수를 결정할 수 있다.

$$z = a_0 + a_1x + a_2y + e \quad (6)$$

$$Sr = \sum (z_i - a_0 - a_1x_i - a_2y_i)^2$$

$$\frac{\partial Sr}{\partial a_0} = \frac{\partial Sr}{\partial a_1} = \frac{\partial Sr}{\partial a_2} = 0 \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} n & \sum x & \sum y \\ \sum x & \sum x^2 & \sum xy \\ \sum y & \sum xy & \sum y^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum z \\ \sum xz \\ \sum yz \end{bmatrix} \quad (8)$$

3.2 직선 벡터 방정식을 이용한 위치 검출

일반적으로 강체 변환 행렬(rigid body transformation matrix)은 회전 행렬(R, rotation matrix) 부분과 병진 행렬(P, translation matrix) 부분을 분리한 식(9)와 같은 (4×4)의 동차변환행렬(homogeneous matrix)로 표시할 수 있다. 이렇게 동차변환행렬을 사용하면 회전 행렬의 역행렬은 전치(transpose)행렬과 같아서 계산이 편리해지는 이점이 있다.

$$T = \begin{bmatrix} R_{(3 \times 3)} & P_{(3 \times 1)} \\ 0_{(1 \times 3)} & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

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 \mathbf{k} 는 원점을 중심으로 한 회전축을 나타내며 k_x, k_y, k_z 는 각 방향 원소들이다.

$$R(k, \theta) = \begin{bmatrix} k_x k_x v + c & k_y k_x v - k_z s & k_z k_x v + k_y s \\ k_x k_y v + k_z s & k_y k_y v + c & k_z k_y v - k_x s \\ k_x k_z v - k_y s & k_y k_z v + k_x s & k_z k_z v + c \end{bmatrix} \quad (10)$$

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

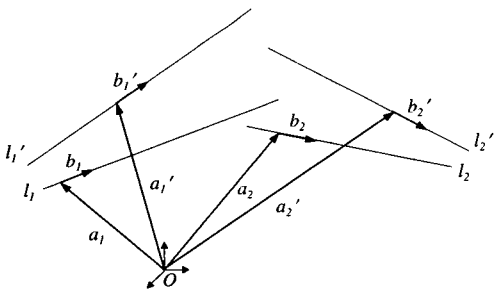


Fig. 4 Two pairs of matched 3d lines

Fig.4와 같이 평행하지 않은 두 개의 직선 l_1, l_2 에 대하여, 이에 대응하는 측정된 벡터 방정식 l_1' ,

l_2' 을 식(11),(12)와 같이 표시할 수 있다.

$$l_1: \vec{x} = \vec{a}_1 + t\vec{b}_1, \quad l_2: \vec{x} = \vec{a}_2 + t\vec{b}_2 \quad (11)$$

$$l_1': \vec{x} = \vec{a}_1' + t\vec{b}_1', \quad l_2': \vec{x} = \vec{a}_2' + t\vec{b}_2' \quad (12)$$

이 때 회전축 \mathbf{k} 는 각 대응하는 방향 벡터를 수직 이동분하는 평면 위에 존재하게 되므로 Fig.5와 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 식(13)과 같이 직선의 방향 벡터 쌍으로부터 계산할 수 있으며, 회전축 \mathbf{k} 는 식(14)와 같이 이들 벡터의 외적이 된다⁽³⁾.

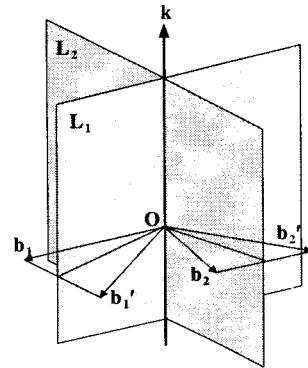


Fig. 5 Axis of revolution

$$\vec{L}_1 = (\vec{b}_1 + \vec{b}_1') \times (\vec{b}_1 \times \vec{b}_1') \quad ,$$

$$\vec{L}_2 = (\vec{b}_2 + \vec{b}_2') \times (\vec{b}_2 \times \vec{b}_2') \quad (13)$$

$$\vec{k} = \vec{L}_1 \times \vec{L}_2 \quad (14)$$

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 \mathbf{k} 의 각 원소들의 부호를 반대로 해주었다. 이렇게 회전축 \mathbf{k} 를 결정하고 나면 회전 각도 θ 는 \mathbf{k} 를 법선 벡터로 갖는 평면에 각 방향 벡터를 투영(projection)시킨 벡터 사이의 각과 같으므로, 각 방향 벡터 쌍에 대해서 식(15)와 같이 계산할 수 있다. 이 때, 각 방향 벡터 쌍에 대해서 각도를 구할 수 있으므로, 실제 측정오차가 있는 실험에 있어서는 계산된 회전 각도들의 평균값을 사용하면 될 것이다.

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

$$\theta_2 = \cos^{-1}[\{\vec{b}_2 - (\vec{b}_2 \cdot \vec{k})\vec{k}\} \cdot \{\vec{b}_2' - (\vec{b}_2' \cdot \vec{k})\vec{k}\}] \quad (15)$$

위와 같이 회전축과 회전각을 계산하여 회전 행렬을 구하게 되면 짝이 되는 선 벡터 방정식들은 Fig.4와 같이 평행하게 놓이게 된다. 이후에 병진 행렬을 구할 때는, 첫 번째 벡터 방정식을 Fig.6의 P_1 병진 행렬로 일치시킨 후에 첫 번째 벡터 방정식의 방향 벡터와 같은 방향의 병진 행렬 P_2 로 두 번째 벡터를 일치시키는 방법으로 구할 수 있다.

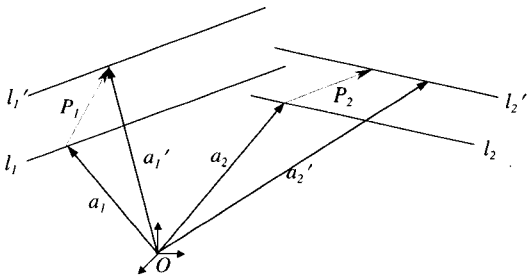


Fig. 6 Translation matrix for 2 matched line pairs

즉 첫 번째 방정식으로부터 구한 병진 행렬은 식(16)과 같이 쓸 수 있으며, 두 번째 병진 행렬은 식(17)과 같이 첫 번째 방정식을 회전시킨 방향의 벡터가 된다. 최종 병진 행렬은 식(18)과 같이 P_1 과 P_2 를 더하면 된다.

$$\vec{P}_1 = \vec{a}_1' - [R]\vec{a}_1 \quad (16)$$

$$\vec{P}_2 = m[R]\vec{b}_1 \quad (17)$$

$$\vec{P} = \vec{P}_1 + \vec{P}_2 \quad (18)$$

여기서, 강체 구속 조건(rigidity constraint)을 만족시킨다면 $\vec{a}_2' - \vec{P}_1 - \vec{P}_2$ 는 l_2 상에 존재해야 하므로 식(19)와 같이 되고, 이를 정리하면 미지수 m, t 에 관한 선형 방정식(20)과 같이 쓸 수 있다.

$$\vec{a}_2' - \vec{P}_1 - m\vec{b}_1' = \vec{b}_2't + [R]\vec{a}_2 \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} \vec{b}_1' & \vec{b}_2' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m \\ t \end{bmatrix} = \vec{a}_2' - \vec{P}_1 - [R]\vec{a}_2 \quad (20)$$

식(20)은 $HX=G$ 형태이므로 유사-역행렬 방법에 의해서 식(21)과 같이 X 벡터의 첫 번째 원소인 m 을 구할 수 있다. 이를 (17)에 대입하면 P_2 를 구할 수 있다.

$$X = (H^T H)^{-1} G \quad (21)$$

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.

4. 측정 실험 및 결과

실제 금형에 대한 모사 실험을 하기 위해 2mm 두께의 스테인레스 강판을 구부려서 측정 시편을 제작한 후 3축 직교 좌표 로봇에 시각센서를 부착하여 측정 실험을 하였다, Fig.7. 먼저 초기 위치에 대해 측정을 수행하고, 시편을 회전시키거나 병진 이동시킨 후 측정을 하여, 초기 위치에 대한 이동 정도를 본 논문의 위치 검출 알고리즘을 통해 계산하였다.

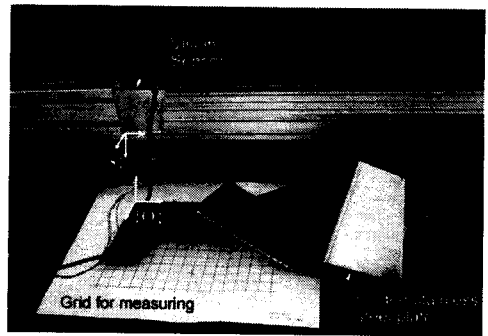
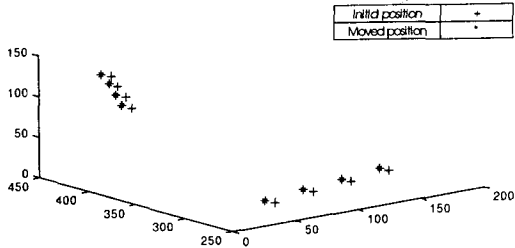


Fig. 7 Experimental setup for measuring of folded stainless steel plate

Fig.8은 대상물에 병진이동만 시킨 후에 위치 검출을 한 결과이고, Fig.9는 병진이동과 회전이동을 같이 한 후에 위치 검출을 한 결과이다. 실제 금형은 평면에 대한 틸팅이 매우 작으므로 회전축 k 는 $[0 \ 0 \ 1]$ 을 사용하였다.

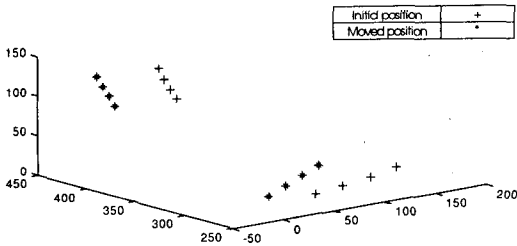
각각의 경우에 대해 회전축과 회전각도, 병진이동 벡터를 계산 하였고, 회전 각도는 대상물의 원점에 대한 위치에 따라 차이를 보이므로 길이 1m 짜리 대상물을 가정하고, 끝단에서 회전 각도오차에 의한 거리오차가 얼마나 커지는 가를 계산해 보았다. 용접을 할 경우 비드폭은 약 1mm 내외에서

허용오차를 가지므로, 실제 용접을 할 경우 문제가 되지 않는 오차 내에서 결과를 얻을 수 있었다.



$$\begin{aligned}
 a1 &= [20.1327 \ 389.9911 \ 119.9299] & b1 &= [0.1582 \ -0.3270 \ -0.9317] \\
 a1' &= [19.9737 \ 399.8351 \ 119.8151] & b1' &= [0.1638 \ -0.3309 \ -0.9293] \\
 a2 &= [112.1968 \ 292.6780 \ 10.0251] & b2 &= [0.9278 \ 0.3613 \ -0.0927] \\
 a2' &= [112.1599 \ 302.4412 \ 9.8990] & b2' &= [0.9282 \ 0.3608 \ -0.0909] \\
 k &= [-0.5390 \ -0.8355 \ -0.1070] \\
 \theta &= 0.1011^\circ, \text{ Error after 1m length} = 1.7645\text{mm} \\
 P &= [-0.0822 \ 9.8230 \ -0.1640]
 \end{aligned}$$

Fig. 8 Result of SUS plate experiment
 $\theta = 0^\circ$, $P = [0 \ 10\text{mm} \ 0]$



$$\begin{aligned}
 a1 &= [20.2141 \ 390.0010 \ 119.9323] & b1 &= [0.1651 \ -0.3025 \ -0.9387] \\
 a1' &= [-32.9150 \ 397.2892 \ 120.0661] & b1' &= [0.2229 \ -0.2705 \ -0.9366] \\
 a2 &= [112.4568 \ 292.3951 \ 9.8441] & b2 &= [0.9265 \ 0.3671 \ -0.0824] \\
 a2' &= [75.0402 \ 317.7648 \ 10.1308] & b2' &= [0.8485 \ 0.5227 \ -0.0820] \\
 k &= [-0.0278 \ -0.0170 \ 0.9995] \\
 \theta &= 10.0862^\circ, \text{ Error after 1m length} = 1.5045\text{mm} \\
 P &= [14.8292 \ 9.7902 \ 0.4355]
 \end{aligned}$$

Fig. 9 Result of SUS plate experiment
 $\theta = 10^\circ$, $P = [15\text{mm} \ 10\text{mm} \ 0]$

5. 결론

본 논문에서는 시각 센서를 이용한 대상물의 위치를 검출하는데 있어서 대응점을 사용하지 않고

선 벡터 방정식을 이용하는 방법을 제시하고, 실험을 통해 검증하였다. 이 방법으로 특징점의 대응이 어려운 금형면과 같은 형상에서 물체의 위치 파악이 가능할 것으로 보인다.

그러나, 본 논문에서 사용한 방법은 직선 모서리가 2개 이상 존재하는 대상물에 한해서 적용이 가능하다. 따라서 자유 곡면의 형상을 인식하고, 위치를 파악할 수 있는 알고리즘의 개발에 대한 연구가 더 필요하다.

참고문헌

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.
5. P.Flynn and A.K.Jain, "3D object recognition using invariant feature indexing of interpretation tables," CVGIP : Image Understanding, Vol. 55, No. 2, pp. 119-129, March 1992.
6. 이승기, "시각센서를 이용한 벨로우즈 생산용 레이저 용접 시스템," 한국과학기술원 석사학위논문, 1998.
7. 유원상, "용접 자동화를 위한 주사 빔을 이용한 시각센서에 관한 연구," 한국과학기술원 석사학위논문, 1995.