

비전센서와 구조화빔을 이용한 용접 형상 측정 시스템

System for Measuring the Welding Profile

Using Vision and Structured Light

한국과학기술원 전자전산학과 김창현, 최대용, 이주장
한국기계연구원 서정, 박경택, 강희신

Abstract The robot systems are widely used in the many industrial field as well as welding manufacturing. The essential tasks to operate the welding robot are the acquisition of the position and/or shape of the parent metal. For the seam tracking or the robot tracking, many kinds of contact and non-contact sensors are used. Recently, the vision is most popular. In this paper, the development of the system which measures the shape of the welding part is described. This system uses the line-type structured laser diode and the vision sensor. It includes the correction of radial distortion which is often found in the image taken by the camera with short focal length. The Direct Linear Transformation (DLT) method is used for the camera calibration. The three dimensional shape of the parent metal is obtained after simple linear transformation. Some demos are shown to describe the performance of the developed system.

KEY WORD 용접, 시각센서, 레이저, 영상처리, 카메라 교정

1. 서론

산업화가 이루어지며 많은 분야에서 자동화가 이루어졌다. 특히, 용접가공은 자동차, 조선, 산업기계 등 과거의 주력 수출품에서 생산성과 정밀도를 향상시키기 위한 방법으로 많이 사용되었다. 용접가공에서는 오래전부터 로봇이 많이 사용되고 있다. 용접 작업에서 용접로봇을 작동시키기 위한 필수적인 작업이 용접 모재의 위치와 형상의 파악과 용접 로봇을 모재에 어떻게 접근시킬 것인지를 정하는 것이다. 이를 위해 과거 CAD 정보를 이용하거나 여러 가지 접촉식^{[1],[2]}, 비접촉식 센서^{[3],[4]} 등을 이용하여 용접선 추적이나 로봇제어를 할 수 있었다.

최근에는 이러한 센서들 중 비전센서^{[5],[6]}를 이용하는 방식이 많이 사용되고 있다. 처음에는 정밀도와 계산상의 문제 때문에 사용되지 않다가 카메라의 분해능과 처리속도가 빨라짐에 따라 여러 분야에서 비전센서가 많이 쓰이고 있는 추세이다. 또한, 비접촉식이고 소형, 경량이므로 마모나 충격을 염려하지 않아도 되고 로봇에 쉽게 탈부착할 수 있는 이점이 있다. 그러나 조명이나 환경에 민감하므로 열이나 불꽃이 많이 일어나는 열악한 용접현장에 적용하기 위해서는 주의가 요구된다.

본 연구에서는 시각센서를 이용한 용접 형상을 측정하는 시스템 제작에 대해 설명하고 있다. 구조화된 레이저 광원과 CCD 카메라를 이용하여 모재의 형상을 추정하고, 이를 토대로 로봇의 제어에 적용할 수 있는 법선벡터와 같은 유용한 정보들을 추출하는 시스템을 구성하게 된다. 메인 컴퓨터에서 카메라와 연결하여 형상획득, 영상처리, 좌표계산 등의 주 알고리즘을 수행하고 필요에 따라 다양한 방법으로 시각화 해 줄 수 있게 된다. 또한 용접작업이 고속화됨

에 따라 형상 측정작업이 실시간으로 이루어 질 수 있도록 한다

II. 시각센서

용접에서 시각센서를 이용한 시스템은 기본적으로 3차원 정보를 얻는 것이 목적이다 이러한 방법에는 두 대의 카메라를 이용하는 방법이 있으나 용접 모재의 특성상 두 영상에서의 대응점을 찾기 힘들어 사용되기 힘들다 여기에서는 구조화된 레이저 광을 이용하여 3차원 정보를 얻도록 한다 여기서는 선 형태로 조사되는 레이저를 이용하였다 선형태의 레이저광을 이용하는 경우, 한 시점에서 평면에 존재하는 형상을 획득하므로 일정 방향으로 움직이는 용접로봇의 경우 그 데이터를 이용하기가 쉽다는 장점이 있다. 본 방법에서는 660nm의 단색 레이저광을 이용하고 이 파장대만을 통과시키는 대역필터를 이용하여 외부 노이즈의 간섭을 최소화하도록 한다. 기본적인 시각센서의 구성은 그림 1과 같다.

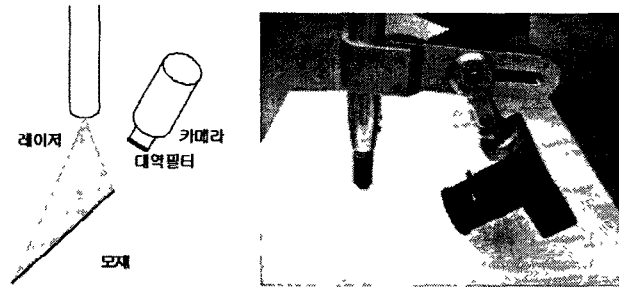


그림 1 시각센서

선 형태를 지니는 레이저광을 이용하는데 조사된 빛이 형성하는 부채꼴 모양의 광평면이 모재의 표면과 교차하는 레이저띠가 모재의 단면 형상을 나타내고 이것을 카메라를 통해 영상으로 획득하게 된다. 이것을 선형변환 시켜 정확한 3차원 정보를 얻을 수 가 있다. 여기서 로봇의 경우 모재의 평면에 법선 방향으로 접근하는 것이 필요하고, 센서시스템을 로봇에 바로 부착을 시켰을 경우 계산상의 편의를 위해 레이저를 모재에 수직방향으로 조사하도록 한다

사용한 레이저광은 3-Laser Technology사의 제품으로 20mW의 출력을 가지며 45도로 퍼지며 초점과 세기는 조절 가능한 것을 이용하였다 사용되는 카메라는 Pointgrey사의 제품으로 IEEE1394를 이용하여 메인 컴퓨터와 교신하며 최대 640×480의 해상도로 최고 30fps까지 지원하며 추후에 성능향상을 위하여 교체할 수도 있다 사용되는 렌즈역시 초점이 조절되는 모델을 썼고 앞쪽에 660nm의 파장대를 통과시키는 Tholabs사의 대역통과 필터를 부착하였다. 실제 제작된 센서에서는 약간의 융통성을 주기 위해 카메라와 레이저의 상대위치를 조절할 수 있도록 설계하였다.

III. 영상처리

3.1 비전처리

CCD 카메라를 통하여 들어오는 영상은 왜곡되는 경우가 많다. 특히 사용하는 렌즈에 따라 영상의 품질이 달라지는데 특히 본 시스템과 같이 근거리에서 사용하게 되면 초점거리가 짧아져 그림 2 (a)와 같은 소위 방사왜곡(Radial Distortion)현상^[7]이 생기게 된다 본 연구에서 사용하는 렌즈 역시 고가의 고급 렌즈가 아니기 때문에 이런 현상이 생기며 일반적인 경우를 생

각하였을 때 이런 현상을 고려하는 것이 바람직하다 흔히 방사왜곡은 카메라 중심으로부터의 거리에 따른 비선형적인 함수에 의해 왜곡되는 것으로 이 왜곡을 보정하지 않고 3차원 형상을 얻게 되면 얻어진 형상에 상당한 오차가 생기게 된다

$(\tilde{x}, \tilde{y})^T, (x_d, y_d)^T$ 가 각각 이상적인 좌표와 왜곡된 좌표라고 하면 방사왜곡은 다음처럼 모델링 된다

$$\begin{pmatrix} x_d \\ y_d \end{pmatrix} = L(\tilde{r}) \begin{pmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \end{pmatrix}$$

여기서 \tilde{r} 은 카메라 중심 $(x_c, y_c)^T$ 로부터의 거리로

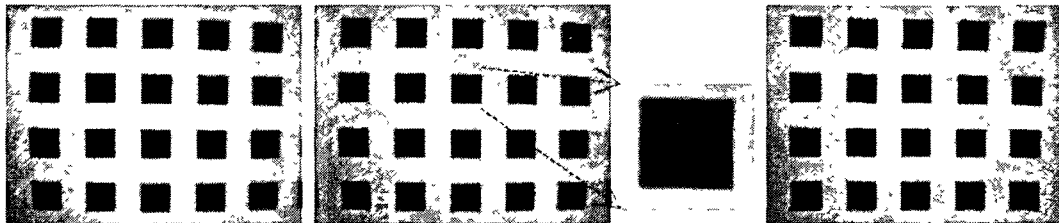
$$\tilde{r}^2 = (\tilde{x} - x_c)^2 + (\tilde{y} - y_c)^2$$

의 관계가 있고 $L(r)$ 은 비선형 함수로 Taylor 전개를 이용하면

$$L(r) = 1 + \kappa_1 r + \kappa_2 r^2 + \kappa_3 r^3 \dots$$

으로 나타낼 수 있다 방사왜곡을 보정하기 위해서는 카메라 중심 $(x_c, y_c)^T$ 와 왜곡 함수 $L(r)$ 의 계수인 $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3, \dots$ 를 찾아야 한다. 이 계수를 찾기 위해서 일반적으로 찾아야 하는 계수의 개수보다 많은 테스트점들을 알고 있어야 한다. 테스트점들을 주기 위하여 그림 2에 나오는 Tsai 격자를 많이 이용한다. 모든 테스트 점들에 대해 알고 있는 실제 좌표와 구해진 계수를 이용해 변형을 했을 때 옮겨지는 좌표간의 거리의 합이 최소가 되도록 계수들을 결정한다 일반적으로 이 문제는 비선형 최소 자승 최적화 문제로 Levenberg-Marquardt 방법을 이용하여 왜곡계수와 카메라 중심을 반복적(iterative)으로 구하게 된다.

격자점의 실제 좌표를 사용자가 모르는 상태에서 구할 수 있게 하기 위하여 직선상에 있어야 하는 점들을 이용할 수 있다 그림 2 (b)에 나타나듯이 Harris 코너 추출기를 이용하여 격자의 꼭지점을 자동으로 찾고, 그 꼭지점들 중 일직선상에 있어야 하는 점들은 쉽게 알 수 있다. 이 점들을 변환시켰을 때, 변환된 점들과 점들이 이루어야 하는 직선으로부터 떨어진 거리의 합을 최적화 함수로 이용하면 원하는 계수를 구할 수 있다 그림 2 (c)는 얻어진 계수를 이용하여 왜곡영상을 보정한 결과이다.



(a) 왜곡된 영상

(b) 꼭지점 추출

(c) 보정 영상

그림 2 방사왜곡의 보정

실제 프로그램에서는 이 과정을 반자동화 하였다 왜곡이 비교적 심한 화면의 가장자리에 위치하는 상하좌우의 4개 그룹의 꼭지점들을 마우스를 이용하여 지정해준다 그러면 위의 과정을 자동으로 수행하여 왜곡계수들을 찾게 된다 프로그램에서는 4차의 모델을 이용하였으며 아래에 찾아진 파라미터를 나타내었다

$$\begin{aligned} x_c &= 320.5, y_c = 240.5, \\ k_0 &= 0.14815, k_1 = -0.001279, \\ k_2 &= -0.033190, k_3 = -0.031047 \end{aligned}$$

또한 실제로 2차 이상의 경우 좌표를 그대로 이용하면 값이 커지기 때문에 정규화된 좌표를 이용하거나 스케일 팩터를 고려하게 된다 여기서는 스케일 팩터를 고려하였으며 보정을 할 때는 위의 값에 스케일 팩터가 곱해진다

3.2 카메라 교정 (Camera Calibration)

레이저띠 형태로 되어있는 영상을 방사왜곡을 보정한 후 3차원 형상을 복원하기 위해서는 카메라 교정 단계를 거쳐야 한다 카메라 영상은 3차원상의 물체를 2차원 평면으로 투사하여 나타내므로, 투사중심으로 향하는 광선상의 어떤 점에서 오는 물체가 화면상에 실제로 맺힌 것인지 모호하게 된다 여기에서는 화면에 맺히는 상이 구조화된 레이저광이 이루는 평면위에 점이라는 것을 알기 때문에 그 점을 유일하게 결정할 수가 있다

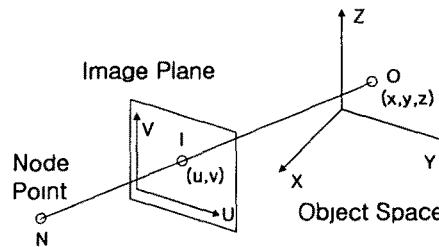


그림 3. 카메라 교정

일반적인 영상처리에서는 실제 차원에 한 차원씩을 더한 동차좌표계(Homogeneous Coordinate)를 많이 사용하며 이 때 실공간(Object Space)상의 점 $O, (x, y, z)$ 와 이에 해당하는 상평면(Image Plane)위의 점 $I, (u, v)$ 와는 선형변환 T 를 이용해 다음의 관계가 있다. 여기에서 레이저띠가 레이저광 평면 상에 있다는 조건이 사용되었다

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ h \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \\ j & k & l \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix}$$

12개의 미지수가 있는데 스케일 팩터 때문에 일반적으로 하나를 고정을 시켜도 되어 미지수가 11개이고 하나의 대응점을 알 때 식이 3개가 나오게 되어 적어도 4점 이상의 대응점을 알면 모든 미지수를 구할 수 있게 된다 대응점들이 주어 졌을 때 얻어지는 식들을 정리하여 미지수에 대해 정리를 하여 결국에는 Pseudo Inverse를 이용하여 최소 자승근을 구할 수 있게 된다. 일반적으로는 에러의 영향을 줄이기 위해 충분한 수의 대응점을 주게 된다 이러한 식으로 구하는 방법을 DLT(Direct Linear Transformation)^[8]이라 한다

대응점을 주기 위해 그림 4와 같이 정교하게 제작된 교정 블록이 이용된다. 이 블록은 좌우 3mm, 상하 2mm의 단차를 가지도록 제작이 되었다. 그림 4에 나타나듯이 이 블록에 레이저를 조사한 영상을 획득한 뒤 꼭지점을 추출하게 된다. 각 꼭지점에 실제 좌표를 주고 영상을 통해 획득되는 점을 이용하여 변환 행렬을 구하게 되고 이 행렬이 구해지게 되면 영상으로 들어온 레이저띠를 변환하여 실공간에서의 형상을 얻을 수 있게 된다

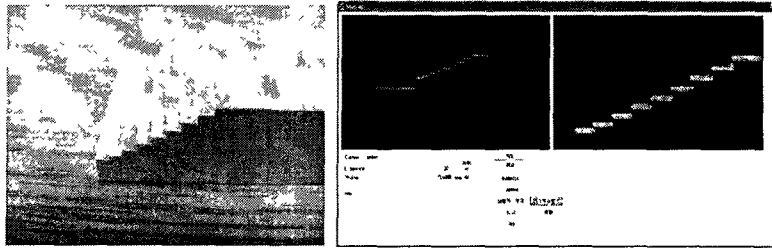


그림 4 교정 블록과 처리 과정

그림에 나타나는 꼭지점 중 13개(필요수 4개 이상)의 대응점을 이용하여 카메라 교정 작업을 수행하였다. 구해진 파라미터들을 이용하여 교정블록에 대해 계산된 좌표와 실제 좌표들의 오차를 구하였더니 RMSE(Root Mean Squared Error)가 0.302mm가 나왔다 이는 10번 실행한 결과를 평균을 취하였다 그 중 한 실험에서 찾아진 DLT 파라미터는 다음과 같다

```

0.288096 -0.279423 -5.106796
-0.068613 -0.713778 178.638603
0.000000 0 000000 0.000000
-0.000921 -0.002241

```

최종적으로 모재나 시각센서가 부착된 로봇을 이동시키면서 레이저 평면상에서 구해진 단면 정보들을 종합하여 전체 표면 형상을 구할 수 있게 된다 구하여진 형상으로부터 로봇 제어에 필요한 여러 가지 정보를 필요에 따라 구할 수 있다

3.3 형상 측정

로봇의 헤드에 장착된 시각센서부가 읽어 들이는 정보를 이용하여 용접하고자 하는 물체의 3차원 정보를 컴퓨터의 모니터에 표시한다. 이를 통해 직접 눈으로 판단하기 힘든 용접부의 진단을 용이하게 하고 간접적으로 로봇의 움직임도 알 수 있다 직접적으로는 모재의 형상 정보를 쉽게 획득할 수 있으며 용접부의 법선 벡터 성분을 추출해서 용접로봇에게 제공한다 프로그램은 OpenGL을 이용하여 제작되었다

- 3차원 표면 시각화

시각센서부에서 1개의 라인을 스캔해서 들어오는 데이터를 즉시 반영하여 현재상태의 용접대상의 표면과 용접 라인 등을 렌더링해서 보여준다 렌더링을 위해서 Triangle Strip Rendering을 사용했다 이 방법은 기존 그래픽스 분야에서 널리 쓰이는 방식으로 사물의 표면을 여러 개의 삼각형으로 표시하는 방법이다. 본 연구에서는 시각센서부에서 들어오는 점들을 바탕으로 실제 용접대상의 표면 상태를 추정하여 표시하게 된다 이 때 시각센서부에서 순차적으로 들어오는 데이터는 하나의 선상에 있게 되는데, 렌더링을 위해서는 이를 재구성해야 한다 즉, 그림 5에서 보는 것과 같이 지그재그로 정점들을 재배치하여야 한다 한편 스캔된 한 Line 정보가 추가될 때마다 렌더링 스페이스를 갱신해야하는데 이때 이전에 렌더링된 표면에 추가하기 위해서는 그림 5의 Line2 와 같이 그 선상의 정점들은 새로 중복 정의된다. 따라서 스캔선상의 처음과 마지막 Line을 제외하고는 다 중복되므로 실제 2n-2개의 Line정보를 사용하게 된다

표면의 깊이를 나타내기 위해서는 범프 매핑에 많이 사용되는 방법을 사용하였다. 즉, Z축이 용접 대상의 깊이 정보이지만 X, Y축의 크기에 비교할 때 거의 표현이 되지 않을 만큼 작은 값이다 이럴 경우는 색깔로 표면의 질감을 표현하게 된다 즉, 각 정점의 RGB 값 들 중 하나에 깊이 값을 빼거나 나누어서 그 표면의 질감을 표현하는 방법이다. 이렇게 함으로써 색깔의 음영으로 물체의 입체감을 표현하게 된다

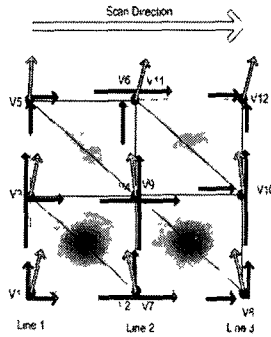


그림 5 렌더링 스페이스와 법선 벡터

- 법선 벡터 추출

용접 로봇이 용접을 제대로 하기 위해서는 용접 평면에 대해 법선 방향으로 접근해야한다 따라서, 법선 벡터를 구하는 정밀도가 중요하게 된다 법선 벡터는 주어진 정점들의 정보를 이용해서 다음과 같은 3가지 경우에 대해서 구하게 된다 구하고자 하는 점이 Corner, Edge, Inner Space에 존재하는 지에 따라 법선벡터를 다양한 방법으로 구할 수 있으며 비고에 그 예를 나타내었다

표 1. 법선 벡터의 계산

구 분	수 식	비 고
Conner	$(V(n+1) - V(n)) \times (V(n+2) - V(n))$	V1
	$(V(n+1) - V(n)) \times (V(n) - V(n-2))$	V5
	$(V(n) - V(n-1)) \times (V(n+2) - V(n))$	V8
	$(V(n) - V(n-1)) \times (V(n) - V(n-2))$	V12
Edge	$(V(n+1) - V(n)) \times (V(n+2) - V(n-2))$	V3
	$(V(n+LineDimension \times 2) - V(n-1)) \times (V(n) - V(n-2))$	V6
	$(V(n+LineDimension \times 2) - V(n-1)) \times (V(n+2) - V(n))$	V2
	$(V(n) - V(n-1)) \times (V(n+2) - V(n-2))$	V10
Inner Space	$(V(n+LineDimension \times 2) - V(n-1)) \times (V(n+2) - V(n-2))$	

IV. 실험결과

실제 실험을 위하여 간단한 3축 직교좌표로봇을 제작하였다 X, Y, Z축으로 이동할 수 있으며 헤드에는 앞서 설명한 레이저 다이오드와 CCD 카메라 뭉치를 장착하고 있다 제어는 일반적인 제어방법과 같이 모터에 엔코더를 장착하여 움직임을 판단한다 용접 진행방향으로 이동하면서 형상을 획득하고 이를 종합하여 전체 형상을 얻을 수가 있다

그림 6은 실제 용접 대상물이 될 자동차 범퍼의 프레임을 가지고 실제로 형상을 모니터링 하는 모습을 보이고 있다 전진 방향으로 1mm씩 전진을 하며 영상을 획득하고 좌표를 얻도록 하였다 일정 시간이 지난 후 획득된 좌표들을 3차원 영상으로 시각화해 준 결과를 보여준다. 그림에서 구멍이 있는 부분이 제대로 나타남을 알 수 있다 또한 획득된 평면을 이용하여 법선 벡터를 추출할 수 있다

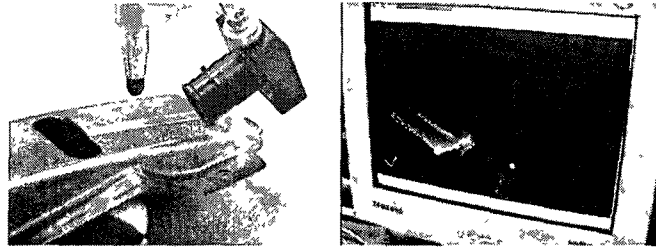


그림 6 영상 획득 과정

V. 결론

시각센서를 이용한 용접 형상 측정 시스템을 구축하기 위한 기본연구와 요소기술을 개발하였다. 직선형태의 구조화된 레이저와 IEEE1394 인터페이스를 가지는 시각센서를 이용하였다. 일반적인 경우를 고려하여 비교적 저가의 렌즈와 카메라를 이용하는 경우에 대해 짧은 초점거리를 가질 때 발생하는 방사왜곡을 없애는 부분을 프로그램상에서 구현하였으며 추후에 다양한 카메라에서도 활용가능하도록 하였다. 이미지상의 좌표와 실제 좌표와의 변환 관계를 알아내는 방법 또한 DLT 방법을 이용하여 프로그램화하였고 간단한 선형 변환을 통해 카메라 영상으로부터 모재의 3차원 형상을 구할 수 있어 실시간으로 적용가능하다. 영상 중 실제 필요한 레이저만을 획득하기 위하여 대역필터를 적용하여 노이즈에 강인하도록 하였다. 마지막으로 간단한 데모를 통해 시스템의 동작을 확인하였다.

현재 실험에 사용된 범퍼에 대해서도 정확한 모델이 없기 때문에 정밀도 측정을 할 수 없었다. 추후에 성능 평가를 위한 샘플을 제작하여 실제 CAD 데이터와의 비교를 통해 개발된 시스템 3차원 형상 측정 성능을 평가할 예정이다.

VI. 참고문헌

1. H Nomura Sensors and Control Systems in Arc Welding, CHAPMAN & HALL
2. J D Lane ROBOTIC WELDING, IFS LTD uk, PP. 91-101, (1987)
3. 김호학, 부광석, 조형석 자동 아크 용접고정의 용접개선변수 측정을 위한 시각 시스템, 대한 용접학회지 8(2), (1990)
4. WF Clocksin, JSE Bromley, PG Dvey, AR. Vidler and C.G Morgan An implementation of model-based visual feedback for robot arc welding of thin sheet steel", The Int J of Robotics Research 4(1), pp 13-26, (1985)
5. 배철오, 김현수 비전센서를 이용한 용접선 추적에 관한 연구, 한국해양정보통신학회논문지 6(8), pp 1374-1380, (2002)
6. 성기은, 이세현 멀티 라인 레이저 비전 센서를 이용한 고속 3차원 계측 및 모델링에 관한 연구, 한국용접공학회 춘계학술대회논문집, pp 169-172, (2002)
7. R. Hartley and A. Zisserman Multiple View Geometry in computer vision, Cambridge University Press, (2000)
8. YI Abdel-Aziz and HM Karara Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry, Proceedings of the Symposium on Close-Range Photogrammetry, pp 1-18, (1971)