

원자로 CRDM 보수 용접 자동화를 위한 레이저 비전 센서의 최적 설계에 관한 연구

A study of optimal design of laser vision sensor for nuclear reactor CRDM repair welding

성기은*, 이세현**, 박광수***, 변진귀***, 김용재***, 김정한****

* 한양대학교 정밀기계공학과

** 한양대학교 기계공학부

*** 두산중공업 기술연구원 소재개발팀

**** 한국생산기술연구원

1. 서 론

용접 공정 자동화를 위한 레이저 비전 센서 설계의 정량화된 최적 설계가 필요하다.

Clocks in et al.[1]과 Agapakis[2]는 모재의 거리 정보로부터 용접점을 인식하고 이로부터 용접선을 찾아내어 이것을 추적하는 것을 제안하였다. Suga와 Ishii[3]는 용접 공정 제어와 자동 용접 검사에 대해서 비전 센서를 사용하였다. Kugai와 Muto[4] 등은 레이저 비전 센서를 이용한 용접 로봇의 제어 기술과 적용에 대해서 연구하였다. Boillot와 Noruk[5]은 아크용접의 로봇을 이용한 자동화에서 레이저 비전 센서가 얼마나 다양한 용도로 사용될 수 있는지 보였다.

이러한 레이저 비전 센서는 세계의 몇몇 회사들에서 상용으로 개발되어 판매되고 있다. 상용 레이저 비전 센서는 여러 작업에 적용 가능하도록 다양한 성능을 가진 제품 군을 형성하고 있다.[6]

그러나 용접 자동화 공정은 유일한 공정인 경우가 많다. 공정 자동화에 필요한 장비 역시 주문 생산되어 설치되는 경우가 대부분이다. 이때 사용되는 레이저 비전 센서는 최적화된 센서를 개발해서 사용하는 것이 가장 좋다. 그러나 이렇게 레이저 비전 센서를 개발하는 것에는 큰 비용이 요구된다. 따라서 상용 제품을 사용하기도 하지만 최고의 성능을 얻지는 못한다.

본 연구에서는 레이저 비전 센서의 설계과정을 정량화하였다. 용접 공정 자동화에 사용되는 레이저 비전 센서는 적용되는 경우에 따라 모두 다른 성능이 요구되지만, 비전 센서는 광학삼각법을 사용하는 기본원리는 모두 동일하다는 것을

이용하여 설계를 정량화 할 수 있었다. 이를 통해 레이저 비전 센서 설계의 난이도를 대폭 낮추고, 개발 시간을 단축하였다. 이러한 결과는 개발 단가가 낮아지는 것을 의미한다. 따라서 가격적인 혹은 시간적인 이유로 최적화된 전용 레이저 비전 센서를 사용하기 힘들었던 경우에도 적용이 가능해졌다.

원자로 CRDM(control rod drive mechanism) 보수 용접 자동화에 필요한 레이저 비전 센서 개발에 이 최적 설계 기법을 적용하였다.

2. 레이저 비전 센서의 설계

2.1 레이저 비전 센서

레이저 비전 센서는 시각센서와 구조화된 광원을 사용하여 3차원 상의 물체의 거리 정보를 얻기 위한 센서이다. 가장 일반적인 시스템 구성은 CCD 카메라와 선 모양의 레이저를 이용하는 것이다. 이 경우 2차원 거리 정보를 얻게 된다.

레이저 비전 센서의 특징은 비접촉식이며, 외부 광원에 대해 영향을 비교적 큰 영향을 받지 않으며, 또한 높은 분해능을 얻을 수 있다(최대 0.001mm). 얻어진 영상을 소프트웨어적으로 처리하여 거리 정보를 얻음으로서, 소프트웨어적인 대응만으로 다양한 분야에 적용이 가능하여 활용도가 증대되고 있다.

2.2 기본적인 설계 조건

센서의 크기는 레이저 비전 센서가 갖는 기본적인 제한 조건이다. 대부분의 자동화 장비의 경우 센서를 부착 할 수 있는 위치 및 센서가 움직일 수 있는 공간은 매우 제한적이다. 아무리 좋

은 기능을 갖더라도 센서가 자동화 장비에 부착이 불가능해서는 안된다.

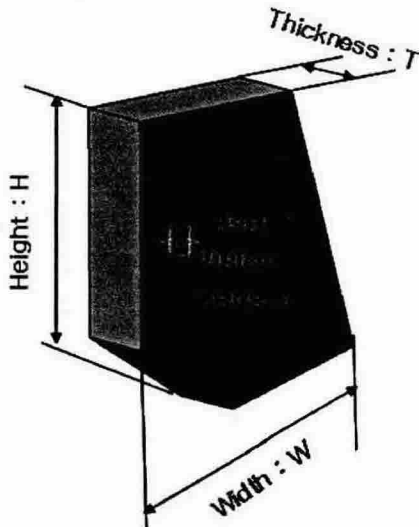


Fig.1 Laser vision sensor size definition

센서의 무게는 센서의 크기와 거의 비례하는 관계를 가지고 있다. 추가적으로 각 센서의 특징, 냉각 방식, 사용되는 부품등에 따라 무게가 추가된다.

대부분의 자동화 장비 및 로봇트는 필요 이상의 가반 중량을 갖지 않는다. 따라서 작업 영역 가장 가까운 곳에 설치 되는 레이저 비전 센서는 중량에 많은 제한을 받는다

측정영역은 폭방향의 측정영역(Field of view, FOV)과 깊이 방향의 측정영역(Depth of view, DOV)로 나뉜다. FOV는 센서에서 가까운 곳과 먼 곳이 다른 값을 갖는다. 설계시 이 두 값이 모두 원하는 영역을 포함 하는지 확인 해야한다.

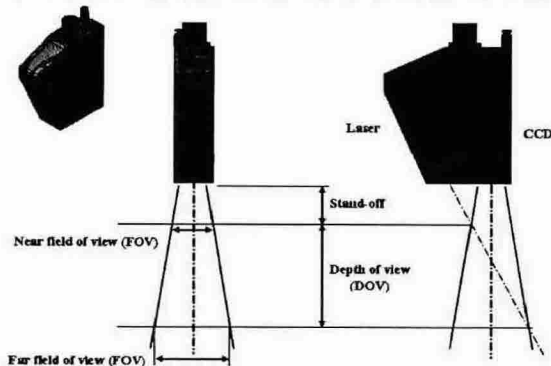


Fig. 2 Sensing area definition

용접의 경우 DOV를 더 중요하게 보는 경향이 강하다. 이유는 용접선의 중요한 정보들 - 맞대기 용접에서 겹, 겹침 용접에서 단차, 필터트 용접에서 두 모재가 만나는 지점 등 \square 이 대부분 높

이 방향 정보가 더 중요하다.

측정 영역에서 중요한 인자는 센싱 가능 영역까지의 길이를 의미하는 Stand-off 길이와 센싱 가능 영역의 크기를 뜻하는 DOV가 있다

용접 자동화에 사용되는 레이저 비전 센서는 pixel당 수mm에서 수십 μ m 정도의 해상도를 갖는다. 이것은 CCD가 구분할 수 있는 최소 단위인 pixel이 실제 측정영역에서 대응되는 길이를 나타낸다.

해상도는 작은 값을 가질수록 좋다. 그러나 CCD의 최대 pixel수는 일반적인 경우 1000을 넘지 못한다. 따라서 해상도는 측정 영역의 크기와 반비례 관계를 갖는다. 해상도가 좋아지면 측정영역이 좁아지고, 측정영역이 넓어지면 해상도가 나빠지게 된다. 많은 경우 이 둘을 최적의 상태로 조절하는 것이 설계의 가장 중요한 일중 하나이다

3. 원자로 보수용 용접자동화를 위한 레이저 비전 센서 설계

3.1 설계 제한 조건

원자로의 CRDM(control rod drive mechanism)은 거대한 돔에 격자모양으로 핵분열 반응을 조정하기 위해 연료봉이 이송 될 수 있도록 만들어진 노즐이다. 이 노즐은 원자로의 지붕에 용접되어 있다. 용접부에 결함 발생 징후가 나타나면 로봇이 용접부를 검사 보수 하는 작업을 하게 된다.

보수용으로 사용되는 로봇의 가반 중량의 제한으로 레이저 비전 센서는 900g을 넘을 수 없다. 또한 로봇 자체의 중량 제한으로 많은 축을 사용할 수 없다. 따라서 용접 토치 이송 축을 공용으로 센싱하는데 사용한다. 이 결과 센서와 용접 토치간의 이송이 서로 영향을 주게 되고 센서 설계시 토치와 센서 모두 충돌이 일어나지 않도록 고려해야 한다.

보수 용접은 TIG 다층용접을 한다. 이때 비드를 측정하고 용접선을 판별하기 위해서는 적어도 0.2mm/pixel보다 작은 해상도가 요구된다.

3.2 레이저 비전 센서 모델

Fig. 3의 모델에서 A와 B가 가능한 영역내의 모든 값에 대해서 C와 θ 를 구한다. 이 값을 통해 센서의 해상도와 크기 등을 추정하게 된다.

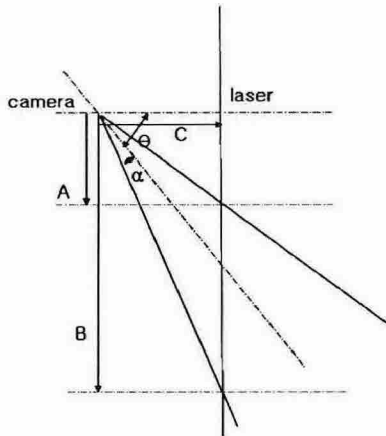


Fig. 3 Simplified geometrical model of vertical laser type vision sensor

이 때 A는 Stand-off, B는 최대 측정 거리, C는 카메라 레이저간 거리, θ 는 카메라와 레이저에 수직인 평면에서의 각 그리고 α 는 카메라 렌즈의 화각의 1/2이다. 입력 변수들에 대해 θ 를 정리하면 식(1)을 얻을 수 있다.

$$\therefore \theta = \tan^{-1} \left\{ \frac{-(A-B)(1+\tan^2 \alpha) \pm Z_c}{2(A+B)\tan \alpha} \right\} \quad (1)$$

$$\text{where } Z_c = \sqrt{(A-B)(1+\tan^2 \alpha)^2 - 4(A+B)^2 \tan^2 \alpha}$$

3.3 설계 변수 최적화

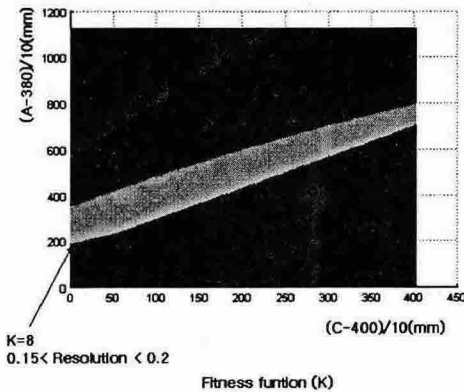


Fig. 4 Fitness function K graph

최적조건을 찾기 위해서 3.1절에서 구해진 제한 조건을 통해 입력 변수의 범위를 구하고 이값을 센서 모델에 넣어 계산한다. 계산 결과 얻어진 해상도, 센서크기 등을 통해 적합도 함수 K를 정의하고 이 함수를 이용하여 최적 설계 값을 찾았다.

적합도 함수 K가 8의 값을 갖는 영역에서 다시 최적의 값은 해상도가 가장 좋은 설계 변수를

갖는 점으로 결정했다.

이렇게 구해진 최적 설계변수는 A=56.2mm, B=176.94, C=40.8mm, $\theta=65.52^\circ$ 이다.

Fig. 5은 개발된 레이저 비전센서를 이용하여 용접부의 형상을 측정한 이미지와 전체 용접부의 형상을 보여준다.

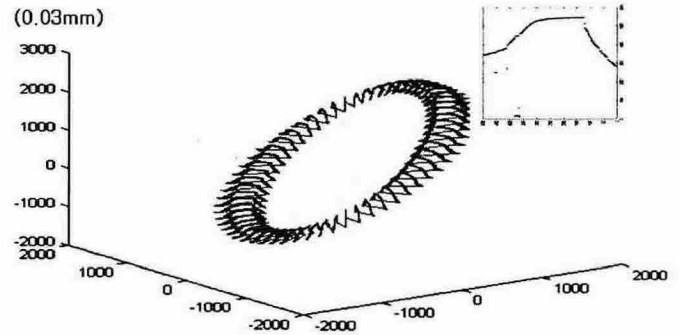


Fig. 5 Observed seam profiles by developed laser vision sensor

4. 결 론

본 연구를 통해 용접 자동화를 위한 레이저 비전 센서를 수치적으로 최적 설계 하였다.

1) 레이저 비전 센서의 수치적 모델을 구하고 이것을 표준화, 정량화 하였다.

2) 구해진 레이저 비전 센서 모델과 적합도 함수 K를 이용해서 설계 변수들의 최적화 된 값을 도출했다.

3) 실제 용접 자동화 공정에 필요한 센서 개발에 적용하여 성공적인 결과를 얻었다.

참고문헌

1. W. F. Clocksin et al. : An implementation of model-based visual feedback for robot arc welding of thin sheet metal, The international journal of robotics research, 4-1 (1985), 13-26
2. J. E. Agapakis : Approaches for recognition and interpretation of workpiece surface features using structured lighting, The international journal of robotics research, 9-5 (1990), 3-16
3. Y. Suga and A. Ishii : Trends of Image Processing Application to Welding Process Control and Inspection of Weld, Journal of JSNDI, 48 (1999), 729-737
4. K. Kugai, S. Muto and T. Mouri : 레이저 센서를 이용한 용접 로봇 제어 기술의 개발과 적용, 熔接技術, 46- 5 (1998), 105-110
5. J. Boillot and J. Noruk : The benefits of laser vision in robotic arc welding, Welding Journal, 81-8 (2002), 32-34
6. web site : <http://www.servorobot.com>