

◆특집◆ 비전응용계측기술

비전센서를 이용한 용접공정의 생산 자동화

박영환*, 성기은*, 이세현**

Manufacturing Automation of Welding Process Using Vision Sensor

Young Whan Park*, Kieun Sung* and Sehun Rhee**

Key Words : Welding process automation (용접공정 자동화), Vision sensor (비전센서), Seam tracking system (용접선 추적 시스템), Weld defect detection (용접 결함 검출), Weld monitoring (용접 모니터링)

1. 서론

비전센서(vision sensor)는 사람의 눈과 같이 주변 환경에 대한 시각적 정보를 주는 강력한 계측장비이다. 이러한 비전센서를 이용하여 기계 시스템에 적용한 머신 비전 시스템(machine vision system)은 용접, 연삭, 디버링등과 같은 생산 및 조립공정의 로봇 교시(teaching)나 제품의 유무, 형상, 가공의 상태를 파악할 수 있는 제품의 모니터링 및 품질검사 분야에 많이 적용되고 있다. 생산공정 이외에도 비전 시스템은 3 차원 영상 인식, 차선의 감지, 물체간의 거리의 측정과 같은 분야에서도 많이 적용되고 있다.^{1,2}

용접 공정에 있어서 비전센서의 응용은 점점 더 그 범위를 확대하고 있다. 초기, 단순히 로봇의 이동경로와 용접부를 모니터로 보여주는 센서로부터 시작되었다. 그러나 현재는 크게 3 가지의 분야에서 활용이 되고 있다. 첫째로는 용접선 추적 시스템이다. 용접선 추적에 있어서 정밀한 추적성과 복잡한 형상에 대한 요구가 커짐에 따라 로봇

의 교시를 자동으로 해 줄 수 있는 시스템이 요구되었고, 이를 비전센서를 이용하는 방법이 많이 연구되고 있다.³⁻¹¹ 둘째로는 용접부 형상을 3 차원적으로 계측하여 용접후의 발생하는 용접 비드의 결함이나, 결함정도를 판단하는데 사용한다. 즉 용접 후, 용접부 완성도나 결함을 검출하는 분야에 비전센서는 사용되고 있다.^{12,13} 셋째로는 용접부의 상태를 모니터링하는 센서로 사용되고 있다. 용접부를 실시간으로 측정함으로써 용접부의 상황을 모니터링할 수 있고, 이를 이용하여 용접 전원을 능동적으로 제어하는데 사용된다.¹⁴⁻¹⁶

용접공정에 있어서 레이저 비전센서는 많은 장점이 있다. 비접촉식이며 다른 센서에 비하여 정밀하고 3 차원 측정이 가능하다는 것이다. 그리고 레이저 비전센서를 이용하는 경우 아크광에 대하여 매우 강건(robust)하다. 또한 실시간적으로 능동제어가 가능하다는 것도 매우 큰 장점이다.

단점으로는 초기의 투자비용이 비싸고 계측된 화상으로부터 우리가 원하는 정보를 얻는데 시간과 노력이 매우 많이 필요하다는 단점이 있다. 기존의 용접선 추적 센서의 경우, 간단한 원리로 구현이 가능했지만 비전센서의 경우 이미지 처리(image processing)이라는 작업을 통하여 정보를 추출하기 때문이다.

본 논문에서는 비전센서의 응용범위로서 용접공정의 자동화에 대한 것을 다루고자 한다. 이에 대하여 기본적인 비전센서의 원리와 이미지 처리

* 한양대학교 기계공학과 대학원

** 한양대학교 기계공학부

Tel. 02-2220-0438 Fax. 02-2299-6039

Email srhee@hanyang.ac.kr

용접 자동화 분야 특히 지능형 시스템을 이용한 용접 자동화와 비전 시스템을 이용한 용접선 추적, 공정 변수의 최적화에 관심을 두고 연구중에 있다.

방법 그리고 로봇과 비전센서의 인터페이스 부분에 대한 이론적 설명을 하였다. 그리고 용접공정에서 비전센서가 쓰이는 분야로서 용접선 추적시스템, 용융풀 계측 시스템 그리고 용접부 결함검출 분야에 대한 것을 다루었다.

2. 비전센서의 원리

2.1 비전센서

일반적으로 비전센서는 CCD(Charge Coupled Device) 카메라나 CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor) 카메라를 이용한다. 카메라로부터 얻은 정보를 컴퓨터에 저장하기 위해서 이미지 그래버(image grabber)를 이용한다.

일반적인 카메라를 통하여는 2 차원적인 정보를 얻을 수 있다. 그러나 실제 용접공정에 있어서 용접선을 추적하거나 용접부의 형상을 측정하기 위해서는 3 차원의 정보가 필요하다.

비전센서를 이용하여 3 차원 정보를 얻는 방법은 스테레오 비전(stereo vision), 구조광 시스템(structured light system), 그리고 모아레(moire) 현상을 이용하는 방법이 있다. 스테레오 비전은 사람의 눈과 같이 2 개의 카메라를 이용하여 기하학적으로 사물을 인식하는 방법이다. 구조광 시스템을 이용하는 방법은 구조광이 물체에 조사되고 이것을 카메라로 찍었을 때, 높이차이에 따라 CCD 카메라에 위치하는 상이 달라지는 것을 이용하는 방법이다. 일반적으로 구조광의 광원으로 단파장의 레이저가 많이 사용되며, 이 경우 레이저 비전센서(laser vision sensor)라는 용어를 쓴다. Fig. 1은 레이저 비전센서의 원리이다. 그림에서 보는 바와 같이 레이저가 구조광으로 조사되고 이를 CCD 카메라로 저장하면 Fig. 2 a)와 같은 원 데이터(raw data) 이미지를 얻게 된다. 이미지의 직선 구조광의 위치로부터 거리 정보를 얻게 된다.

2.2 이미지 처리와 특징점의 추출

Fig. 2는 겹치기(lap joint) 용접에서 레이저 비전센서를 이용하여 계측한 이미지이다. Fig. 2의 이미지와 같은 원 데이터에서 사용자가 원하는 정보를 얻기 위해서는 일반적으로 2 단계의 작업이 필요하다. 첫 단계는 카메라로부터 얻은 이미지를 처리하는 단계이고, 두 번째 단계는 이미지로부터 우리가 원하는 정보를 추출하는 단계이다.

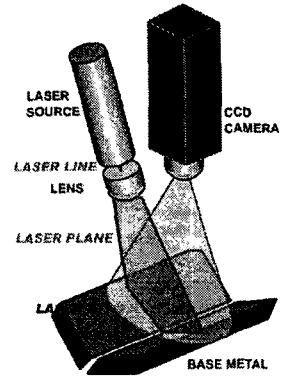
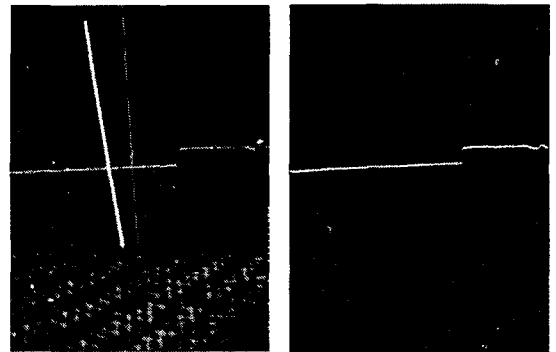


Fig. 1 Schematic illustration of laser vision sensor



(a) Raw image (b) Image after processing

Fig. 2 Image data for laser vision sensor

일반적으로 용접공정에서 비전센서를 이용하여 얻은 데이터는 용접중의 스패터, 구조광의 난반사등의 다양한 원인에 의하여 많은 노이즈를 담고 있게된다. 이러한 노이즈들을 제거하고, 의미있는 데이터만을 얻기 위하여 다양한 이미지 처리 작업을 수행한다. Fig. 2 (a)는 원 데이터로서 수직으로 난 선은 용접중 스패터에 의해 발생한 노이즈이며, 하단의 무늬는 차폐막의 난반사에 의해 발생된 노이즈이다. Fig. 2 (b)는 (a)의 그림을 이미지 처리 후의 사용자가 원하는 레이저 선(strip)을 얻은 이미지이다.

이와 같이 이미지 처리 후에 용접부의 특징점을 찾아야 한다. 이를 위해서는 먼저 세선화(thinning) 작업이 필요하다. 세선화란 여러 개의 픽셀의 레이저 선을 하나의 픽셀의 레이저 선으로 바꾸는 작업이다.

레이저 선의 세션화 후 특징점을 얻는 방법은 다양한 방법이 사용된다. 대표적인 예가 중심차분법으로 레이저 중심선의 농도값을 2 차 미분하는 방법과 적합한 중심선 세그먼트(segment)의 기하학적 매개변수와 모델의 기하학적 매개변수를 비교하는 방법, 그리고 경사탐색법으로 점들간의 각도가 미리 선정된 각도보다 큰 경우 특징점으로 잡는 방법등이 있다. 이러한 특징점을 잡는 방법은 용접부의 형상이나 그루브(groove)의 형상에 따라 적절하게 변형되어 사용된다.

Fig. 3 은 이와 같은 과정을 통하여 얻은 겹치기 용접의 그루브 정보와 이에 따른 특징점들의 값을 표현한 것이다. 용접선 추적에는 이와 같은 정보를 이용하여 용접선 추적(seam tracking)을 수행하여, 용접부 품질평가 시스템에서는 용접부의 외관검사 및 비드의 형상을 측정한다. 그리고 모니터링에 있어서는 용접풀의 형상에 대한 정보를 이용한다.

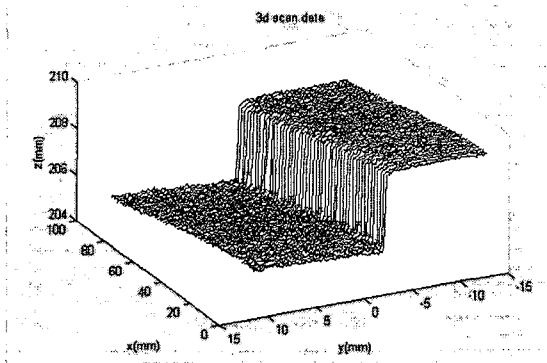


Fig. 3 Feature extraction and computed groove shape

3. 용접공정에서의 비전센서

3.1 용접선 추적 시스템

용접공정에서 비전센서가 가장 많이 사용되는 분야는 용접선 추적 시스템이다. 로봇 용접을 위해서는 대부분 설계정보, CAD 데이터등을 이용한다. 그러나 가공오차, 지그오차, 로봇오차 등에 의하여 실제 설계 및 용접선 정보는 다른 값을 갖는다. 이러한 차이에 대해서는 사람이 직접 보정하여 주어야 한다. 이 경우에 있어서 매우 많은 시간이 소요되며, 특히 3 차원 곡면 같은 경우 교시

사람의 눈으로 교정하는 것에는 한계가 있다.

이를 보완하기 위하여 비전센서를 이용하여 로봇의 이동 경로를 교시하면 정확한 용접선 추적을 할 수 있다. 또한 지그의 공차나 열변형에 의하여 발생될 수 있는 오차들을 능동적으로 제어함으로써 정확한 용접을 수행할 수 있다.

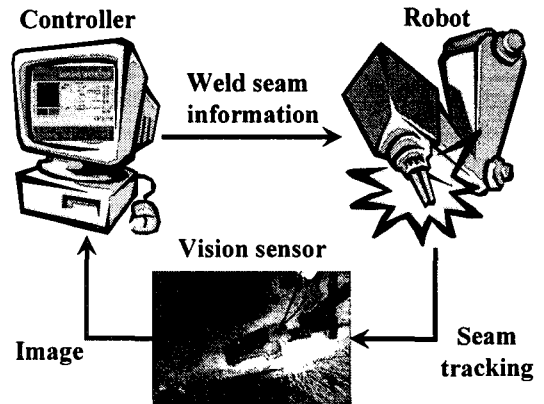


Fig. 4 Interconnection of vision sensor, controller and robot

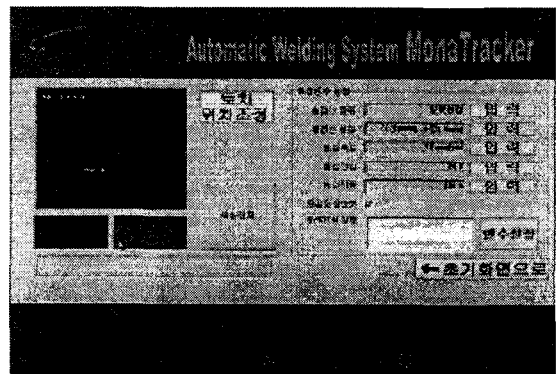


Fig. 5 User interface of weld seam tracking system

이를 위해서는 비전센서와 로봇과의 연동이 필요하다. 로봇과 비전센서간은 인터페이스가 필요하다. 일반적인 경우, PC (personal computer) 기반의 제어가 많이 사용된다. 이것은 비전센서에서 오는 이미지 데이터를 효과적으로 수집하고 이미지 처리하며, 로봇간의 인터페이스가 상대적으로

쉽기 때문이다. 비전센서와 로봇 그리고 제어기간의 연결은 Fig. 4 와 같다. 그리고 로봇과 비전센서를 조작(operating) 하기 위해서는 제어기 상의 사용자 인터페이스(user interface)가 필요하다. 사용자 인터페이스에 예가 Fig. 5 와 같다.

용접선 추적 시스템에 있어서 고려하여야 할 사항 중에 하나는 비전센서와 실제 용접 토치간에 오프셋(off-set) 거리차가 존재한다. 그러므로 계측 시간과 실제 용접토치가 용접점을 지나는 시간이 다르므로 지연시간(delay time)을 고려하여 용접선을 추적하여야 한다. 오프셋 거리차가 길면 지연 시간동안 발생하는 문제점에 능동적으로 대처할 수 없고 오프셋 거리가 짧으면 용접부에서 발생하는 스패터와 아크광에 의해 계측이미지의 노이즈가 많이 발생하므로 오프셋 거리를 최적화 하여야 한다.^{10,11}

또한 레이저 용접이나 다전극 용접과 같은 고속 용융 용접에 있어서 비전센서의 효율이 급격히 떨어진다. 이것은 일반적인 CCD 카메라의 계측속도가 초당 30 프레임(frame) 밖에 지원하지 않으므로 용접속도가 빠를수록 각 프레임간의 이동 거리가 많아지기 때문이다. 이를 극복하기 위하여 여러 개의 레이저 구조광을 이용하여 계측하는 방법인 다선 레이저 비전센서(multi line laser vision sensor)가 사용되기도 한다. Fig. 6 은 다선 레이저 비전센서의 계측이미지 이다. 다선 레이저 비전센서의 또 하나의 장점은 계측된 구조광의 모습을 이용하여 2 차원적인 굴곡을 계측할 수 있으므로 용접중 발생하는 변형에 의한 정보도 알 수 있다.

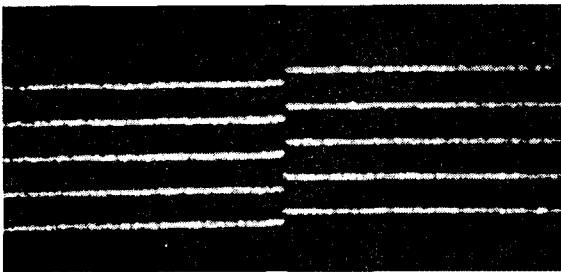


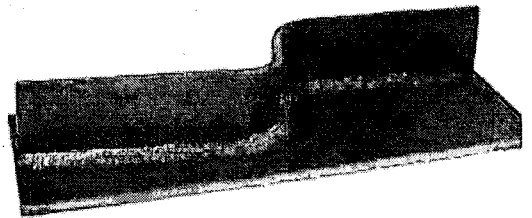
Fig. 6 Vision image with multi line laser vision sensor

비전센서로부터 얻은 결과를 이용하여 로봇의 이동경로를 생성하는데 있어서 직선형태의 용접선인 경우, 비전센서의 이미지로부터 얻어진 특징점을 순차적으로 직선으로 이동시켜 용접선을 추적

하면 된다. 그러나 용접선이 곡선 형태 일 때 그 곡률반경이 매우 작으면 두 점을 직선으로 연결하면 용접선을 정확하게 따라 갈 수 없다. 이 때는 용접부의 기하학적 모델을 이용하여 용접선을 생성하는 방법이 이용된다.⁸ Fig. 7 의 (a)는 이러한 방법을 이용하여 곡선의 용접선에 대한 용접 로봇의 경로를 생성한 결과를 보여주고 있으며, (b)는 이러한 결과를 이용하여 용접선을 추적한 결과를 보여주고 있다.



(a) Robot path from the geometric models



(b) Welding experiment result

Fig. 7 Weld result with seam tracking system with laser vision sensor

3.2 용접부 결함 판단 시스템

용접에 있어서 용접부의 품질은 완성제품의 품질과 직접적으로 연관되므로 매우 중요하다. 용접의 결함은 크게 형상 치수상의 결함, 구조 조직상의 결함, 그리고 성질상의 결함으로 분류된다. ISO-6520 과 ISO-5817 은 용접의 결함의 예와 결함의 허용범위에 대하여 정의하고 있다.

비전센서를 이용한 용접부 품질 평가는 용접부의 외관상의 결함을 찾아낼 수 있다. 대표적인 외관상의 결함은 과도한 용접 덧살(excessive reinforcement), 함몰 비드(concave bead), 언더컷(undercut), 그리고 용접부 표면에 발생한 피트(pit),

나 용접 위치의 불량 등이다.

Fig. 8 은 자동차의 현가장치의 비드 외관검사를 한 예이다. Fig. 8 에서 보는 바와 같이 속 흡서버(shock absorber)의 캡(cap)과 몸체를 아크 용접한 부위를 레이저 비전센서를 이용하여 외관검사를 하고 있다. 그림의 라인이 레이저 구조광이며 불투명하게 표시된 부분이 비전센서로 측정하는 부분이다.

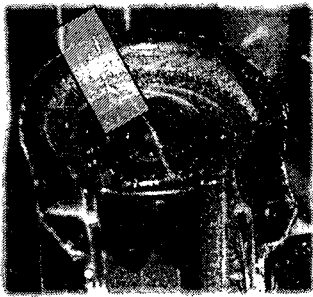
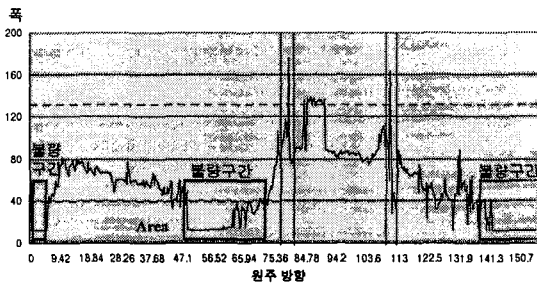


Fig. 8 Bead appearance inspection on the shock absorber with laser vision sensor



(a) Range image



(b) Feature extraction and quality prediction

Fig. 9 Quality estimation using laser vision sensor image

Fig. 9(a)는 레이저 비전센서를 이용하여 얻은 결과를 3 차원화 하기 위하여 이미지를 변환한 이

미지다. 다시 말하면 레이저 비전센서로부터 얻은 Fig. 3 과 같은 데이터를 z 축 방향으로 높은 곳은 흰색으로 낮은 곳은 검은색으로 변환하여 나타낸 이미지이다. Fig. 9 (a)의 하단부는 캡의 바깥쪽을 상단부는 중심 방향이다. Fig. 9 (b)는 (a)의 데이터로부터 비드폭의 값을 추출한 결과이다. 40 과 130 의 위치에 있는 점선은 비드폭의 하한한계와 상한한계를 나타내는 부분이다. 이 한계를 벗어나는 부부는 불량 구간이 된다.

본 용접부 품질평가 시스템은 1 개의 현가장치에서 캡 부분과, 마운트 브라켓(mount bracket)의 2 부분, 그리고 스프링 시트(spring seat)의 1 부분을 측정한다. Fig. 10 는 이러한 데이터를 이용하여 사용자가 편리하게 데이터를 읽고 판단할 수 있는 품질판단 프로그램이다. 이것을 통하여 불량률의 원인을 쉽게 판단할 수 있고, 용접 결과에 대한 통계를 얻을 수 있다.¹³

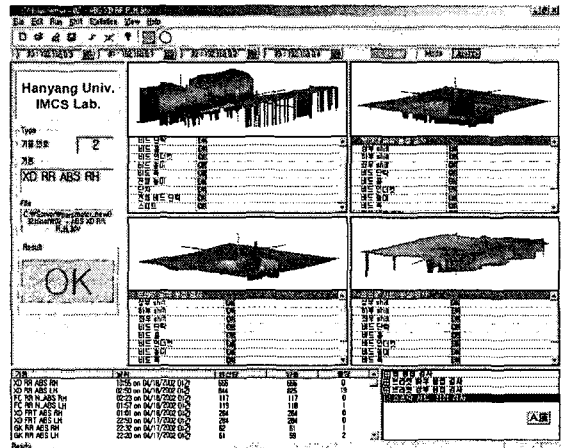
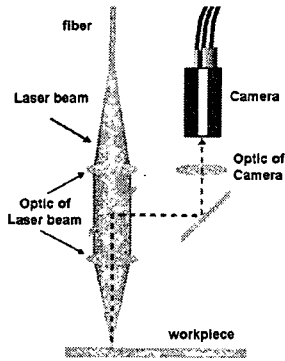


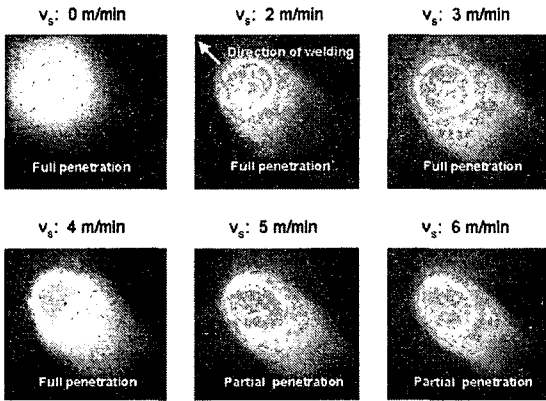
Fig. 10 Quality estimation program representing the result of inspected welding bead

3.3 응용플 계측 시스템

비전센서는 용접공정의 계측센서로서 용접공정을 모니터링하여 용접의 상태를 파악하거나 용접 공정을 제어하는데 사용된다. 용접공정을 모니터링하는 방법은 계측된 2 차원의 이미지로부터 특징점을 이미지 처리 기법으로 찾아내고, 특징점들의 정량적 결과들 예를 들면 비드폭, 키홀의 위치와 크기 등을 측정하여 그 결과를 바탕으로 용접품질의 양부와 제어기의 입력신호로 사용한다.



(a) Co-axial monitoring system using CMOS camera



(b) Examples of captured image

Fig. 11 Laser welding monitoring system using vision sensor for quality estimation¹⁶

Fig. 11 은 레이저 용접에서 용접공정을 모니터링한 예이다. 레이저 용접공정의 모니터링에 있어서 CCD 카메라나 CMOS 카메라를 이용한 용접 공정 모니터링은 많이 사용되고 있으며 용접기 헤드와 일체화된 제품이 상용화 되어있다. Fig. 11 (a) 는 동축 모니터링 시스템으로 레이저가 조사되는 방향과 같은 방향으로 용융풀을 모니터링 하는 방법이다. 그리고 Fig. 11 (b)는 용접 조건에 따른 계측 이미지의 예이다. Fig. 11 에서 보는 바와 같이 용접조건에 따른 기홀과 용융풀의 거동이 상이하게 나타나므로 완전 용입(full penetration)과 불완전 용입(partial penetration)을 구분할 수 있게 된다.

동축 모니터링의 장점은 직각에서 용융풀을 봄으로써 정확한 용융풀과 기홀의 계측이 유

리하다는 점이다. 그러나 레이저와 같은 선상에서 계측하므로 레이저의 빛에 의하여 노이즈 성분이 계측이미지에 나타난다. 그러므로 이런 외란 성분을 방지하기 위하여 적절한 광학 필터(optical filter)와 빔 스플리터(beam splitter)의 설계가 필요하다.

아크 용접에서도 CCD 카메라를 이용한 비전 센서를 적용하여 용접시스템의 모델링과 제어에 사용되었다.¹⁴ GTA (gas tungsten arc) 용접에 있어서 용융풀과 아크를 CCD 카메라를 이용하여 용융지 화상을 얻은 후 이를 화상처리하여 그레이 레벨 (grey level)의 분포를 획득한다. 이 정보를 이용하면 용융지의 폭을 예측할 수 있다. 또한 용접시스템의 입력인자들 예를 들면 용접전류, 용접전압 그리고 용접속도등과 계측된 용융지 폭에 대한 다양한 예측모델을 구할 수 있다. 그리고 예측모델을 이용하여 PI 제어기, 적응제어기 등을 이용하여 최적의 용융지 폭을 제어하는 데에도 비전 센서는 사용되었다.

4. 결론

비전 센서는 인간의 시각을 대신하여 화상을 이용하는 센서로서, 현재 용접을 비롯한 다양한 자동화 공정에 사용되고 있다. 비전 센서를 통하여 다양한 이미지를 얻게된다. 이와 같은 원 데이터로부터 다양한 정보를 얻기 위해서는 반드시 이미지 처리(image processing)가 선행되어야 한다. 비전 센서로부터 얻은 다양한 정보는 각 적용범위에 따라 매우 효과적으로 사용되고 있다.

용접공정에 있어서는 비전 센서가 적용되는 분야로는 용접선 추적 시스템, 용접부 형상의 계측, 그리고 용접부 모니터링 시스템에 적용되고 있다. 용접선 추적 시스템에 있어서는 용접선 추출 알고리즘, 로봇과의 인터페이스, 용접선 경로 생성 (path planning)과 같은 기술이 매우 중요하며, 현재 용접 자동화 분야에서 가장 많이 사용되고 적용된 분야이다. 그리고 형상 계측 방법을 이용하여 용접부의 3 차원 형상을 측정하여 용접부의 폭, 높이, 위치 등의 정보로 용접부의 결함 유무를 판단하는데 사용하고 있다. 비전 센서를 이용하여 용접부의 상태를 모니터링하는 센서로 사용되고 있다. 용접풀을 실시간으로 측정함으로써 용접부의 상황을 모니터링할 수 있고, 이를 이용하여 용접 품질

을 판단할 수 있고, 용접 전원을 능동적으로 제어 하는데 사용된다.

이와 같은 비전센서의 기술은 다양한 용접공정에 적용이 가능하며, 앞으로 용접 자동화에 있어서 더 큰 역할을 담당할 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Smati, Z., Yapp, D. and Smith, C. J., "Laser Guidance System for Robots, Robotic Welding," Springer-Verlag, 1987.
2. Fujita, K. and Ishide, T., "Adaptive Control of Welding Condition Using Visual Sensing," Chapman & Hall, 1994.
3. Clocksin, W. F., Bromley, J. S. E., Davey, P. G., Vidler, A. R. and Morgan, C. G., "An Implementation of Model-based Visual Feedback for Robot Arc Welding of Thin Sheet Metal," The International Journal of Robotics Research, Vol. 4, No. 1, pp. 13 – 26, 1985.
4. Besl, P. J., "Geometric Modeling and Computer Vision," Proceedings of the IEEE, Vol. 76, No. 8, pp. 936 – 958, 1988.
5. Nitzan, D., "Three-dimensional Vision Structure for Robot Applications," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 10, No. 3, pp. 291 – 309, 1988.
6. Agapakis, J. E., "Approaches for Recognition and Interpretation of Workpiece Surface Features Using Structured Lighting," The International Journal of Robotics Research, Vol. 9, No. 5, pp. 3 – 16, 1990.
7. Agapakis, J. E., Katz, J. M., Friedman, J. M. and Epstein, G. N., "Vision-Aided Robotic Welding: An Approach and a Flexible Implementation," The International Journal of Robotics Research, Vol. 9, No. 5, pp. 17 – 34, 1990.
8. Kim, P. Y. and Rhee, S., "Automatic Teaching of Welding Robot for Free-formed Seam Using Laser Vision Sensor," Optics and Laser in Engineering, Vol. 31, No. 3, pp. 173 – 182, 1999.
9. Bae, H. S. and Kim, H. W., "A Study on the Vision Sensor System for Tracking the I-Butt Weld Joints," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 18, No. 9, pp. 179 – 185, 2001.
10. Sung, K. and Rhee, S., "Development of Multi-line laser Vision Sensor and Welding Applications," Proceedings of the 2001 Spring Annual Meeting of Korean Welding Society, Vol. 38, pp. 49 – 52, 2001.
11. Sung, K. and Rhee, S., "Development of laser vision sensor with Multi-line for High Speed Lap Joint Welding," International Journal of Korean Welding Society, Vol. 2, No. 2, pp. 57 – 60, 2002.
12. Barnett, R. J., Cook, G. E., Strauss, A. M., Andersen, K. and Springfield, J. F., "A Vision-Based Weld Quality Evaluation System," Trends in Welding Research, Proceedings of the 4th International Conference, pp. 689-694, 1999.
13. Lee, H. J. and Rhee, S., "A Study of Bead Shape Inspection Using Laser Vision Sensor in GMA Welding Process," Proceedings of the 2002 Spring Annual Meeting of Korean Welding Society, Vol. 40, pp. 218 – 221, 2002.
14. Um, K. W., Rhee, S. and Kim, D. C., "Modeling and Control of Welding Processes Using Vision Sensor," Journal of Korean Welding Society, Vol. 14, No. 4, pp. 7 – 15, 1996.
15. Beersiek, J., "On-line Monitoring of Keyhole Instabilities during Laser Beam Welding," Proceedings of ICALEO 99, Section D, pp. 49 – 58, 1999.
16. Beersiek, J., "A CMOS Camera as a Tool for Process Analysis not only for Laser Beam Welding," Proceedings of ICALEO 01, Section F, F 206, 2001.