레이저 비전 센서 기반 필릿 용접 품질 검사 시스템 개발

정 의 태* · 이 형 준* · 이 인 수**,*

*아진산업(주) 선행기술연구소

**경북대학교 IT대학 전자공학부

Development of Quality Inspection System for Fillet Welding
Based on Laser Vision Sensor

Ui-Tae Jeong*, Hyeong-Jun Lee*, and In-Soo Lee**,*

*A-JIN industrial CO., LTD. Advanced Research Team, Gyeongsan, 38462, Korea

**School of Electronics Engineering, Kyungpook National University, Daegu, 41566, Korea

*Corresponding author : insoolee@knu.ac.kr

(Received July 25, 2018 ; Revised October 1, 2018 ; Accepted November 30, 2018)

Abstract

In this paper, we propose a laser vision sensor based welding quality inspection algorithm, and implement a welding quality inspection system for fillet welds. Welding quality control is very important in the automotive industry. The proposed inspection algorithm examines mandatory inspection items requested by the person in charge of various types of welding defect. Laser vision sensor based welding quality inspection system composed of laser vision sensor, electronic rotary and inspection PC that inspection program installed. Laser vision sensor is a device that acquires laser profile data from the cross section of the weld and consists of a 3D camera and line laser module. The electric rotary serves to transport the laser vision sensor to inspect the weld bead along the nut's perimeter. The inspection program controls the laser vision sensor and the electric rotary. It also provides GUI for monitoring test results. A specimen was prepared for the performance evaluation of the welding quality inspection system. The experimental results show that the system and the inspection algorithm implemented by the proposed algorithm effectively detect important defects in various production sites.

Key Words : Laser vision sensor, Fillet welds, Welding quality, Vision inspection system

1. 서 론

자동차에서 용접 부위는 사고 발생 시 치명적인 결과를 초래할 수 있으며 용접 불량에 대한 리콜은 제조사에 매우 큰 경제적인 손실을 야기하므로 용접 품질 관리가 필요하다. 용접부의 품질을 검사하기 위하여 현업에서 일반적으로 사용하는 방법은 파괴 검사의 일종인 단면 매크로 검사(macroscopic examination)이다. 단면 매크로 검사는 용접 비드(welding bead)를 직각으로 절단한 후 연마, 부식하여 현미경으로 절단면을 검사하는 방법이다. 산업 현장에서 주로 사용되는 방식

이지만 전수검사가 불가능하고 검사하는데 시간이 오래 걸린다는 단점이 있다.

최근에는 생산성 증가, 품질 향상, 인력 부족 등의 문제를 해결하기 위하여 비전을 이용한 용접 품질 검사 자동화 시스템 구축에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다¹⁻⁵⁾. 비전 검사는 육안 검사를 대체하는 비파괴 검사 방법이며 용접부의 치수 불량이나 스패터(splatter), 표면 균열(crack), 피트(pit), 언더컷(undercut), 크레이터(crater) 등의 구조 불량 검사가 가능하다. 2차원 영상 기반의 비전 검사 시스템은 2차원 영상 기반으로 용접 비드를 추출하여 폭과 길이를 측정하거나¹⁻³⁾ 용접된 너트의 누락 유무 및 위치 검사가 가능하다⁴⁾.

그러나 2차원 영상 기반의 비전 검사 시스템은 측정 정확도가 조명의 변화에 큰 영향을 받으며, 비드의 높이에 의한 결함을 검사하지 못하는 단점이 있다. 이를 극복하기 위해 3차원(three-dimensional, 3D) 비전 기술을 이용한 용접 검사 솔루션 개발이 적극적으로 진행되고 있다⁶⁻¹²⁾. 3D 비전의 일종인 스테레오 비전을 이용한 품질 검사 시스템은 용접 비드의 두께를 측정할 수 있으나 조명을 사용함으로써 2차원 영상 기반 비전 시스템과 동일한 단점이 있다⁶⁾. 라인 레이저(line laser) 기반의 3D 비전 센서는 광 삼각법(laser triangulation)을 이용하며 조명 환경 변화에 강인한 장점이 있다. Huang은 용접 공정을 모니터링하고 제어하기 위해 레이저 기반 머신비전 시스템을 구현하는 방법을 제안하였고⁷⁾, Qu는 웨이블릿 변환을 이용해서 언더컷 불량률 검출하는 알고리즘을 제안하고 있다⁸⁾. Lee는 레이저 기반 비전시스템에서 획득한 데이터로부터 분할법의 원리를 적용하여 특징 점을 추출하고 각 점을 선분으로 연결하여 용접 비드를 추출하는 알고리즘을 제시하였다⁹⁾. Lee는 각각 부재에 대해 leg gauge를 대체하여 용접 비드의 각장과 언더컷 깊이를 측정할 수 있는 휴대용 용접 비드 검사 장비를 제안하였다¹⁰⁾. Sung은 레이저 비전 센서를 사용해서 용접선을 검출하고 용접 품질을 검사하는 시스템을 제안하였으나 품질 검사 알고리즘을 제시하지 않고 있다¹¹⁾. Lee는 레이저 비전 센서를 이용해서 GMA용접 외관 검사 및 결함 검출을 위해 비드의 시작점을 찾는 알고리즘을 제시하였으나 용접 결함 검출에 대한 구체적인 알고리즘 및 데이터를 보여주지 않고 있다¹²⁾. 기존 연구에서는 용접 비드를 검출하기 위한 다양한 알고리즘을 제시하고 있으나 산업 현장에서 필요한 다양한 검사 항목에 대해서는 다루고 있지 않다.

본 논문에서는 레이저 비전 센서 기반 필릿 용접 품질 검사 시스템을 제안한다. 제안하는 시스템은 너트와 같이 둥근 형태의 부재 경계를 따라 용접하는 필릿 용접부에 대해서 용접 품질을 검사한다. 그리고 레이저 비전 센서로 획득한 프로파일(profile) 데이터 기반으로 용접 비드의 검출 및 실제 생산 현장에서 요구하는 주요 용접 결함에 대한 검사 알고리즘을 제안한다. 마지막으로 실험을 통해 검사 알고리즘의 효과성을 검증하였다.

2. 용접 품질 검사 시스템

2.1 시스템 구성

용접 품질 검사 시스템은 Fig. 1과 같이 검사 프로그램,

Fig. 1 System configuration

램, 레이저 비전 센서, 전동 로터리, PC로 구성된다.

검사 프로그램은 크게 메인 라인 프로그램(main line program, MLP), 영상 처리 알고리즘(image processing library), 모니터링 GUI(graphical user interface)로 구성된다. MLP는 전동 로터리 및 조명을 시리얼 통신으로 제어하며, 레이저 비전 센서 및 공정 제어판과 통신을 한다. 그리고 레이저 비전 센서로부터 수신한 프로파일 데이터를 영상 처리 라이브러리로 전달하여 용접 품질을 검사한다. 모니터링 GUI는 검사 결과를 Fig. 2와 같이 화면에 표시하는 역할을 한다.

레이저 비전 센서는 카메라와 라인 레이저가 일체형으로 구성된다. 그리고 용접부의 2D 영상을 획득을 위해 필요한 조명이 레이저 비전 센서 하단에 위치한다. 시중에 판매되는 일체형 제품들은 사용자 친화적인 GUI와 데이터 보정, 높이 측정 등의 다양한 편의 기능을 제공하고 있다. 그러나 이들은 대부분 해외에서 생산되어 고가이므로 산업 현장에 적용하기에는 적합하지 않다. 그리고 제공하는 많은 기능에서 일부 기능만이 현장에 활용된다. 최근에는 국내 기업에서 상대적으로 저렴한 가격에 프로파일 데이터 출력이 가능한 3D 카메라 모듈을 출시하고 있다. 본 논문에서는 국내 기업

Fig. 2 GUI for monitoring

Fig. 3 Laser vision sensor

에서 생산하는 3D 카메라 단품을 라인 레이저와 함께 일체화하여 레이저 비전 센서를 구성한다. 그리고 이 레이저 비전 센서를 적용하여 용접 품질 검사 시스템을 구현한다. Fig. 3과 같이 레이저 비전 센서 기구에 카메라와 라인 레이저를 고정한 후 3D 카메라 캘리브레이션(calibration)을 수행한다¹³⁾. 검사 제품과의 간섭을 예방하기 위해 기준 거리는 200mm로 결정한다. 기준 거리에 존재하는 피사체를 검사하기 위해 렌즈의 초점 거리를 적절하게 조정한다. 이 때 피사체 심도는 40mm이다.

전동 로터리는 너트 외경을 따라 존재하는 용접 비드를 검사하기 위하여 레이저 비전 센서를 회전 이동시킨다.

2.2 용접 품질 검사 알고리즘

용접 부위에서 발생하는 많은 불량 유형 중에서 필릿 용접 품질 검사 시스템은 산업 현장에서 요구하는 주요 항목을 검사한다. 용접 품질 검사 시스템에서 검사하는 항목은 Table 1과 같다. 검사를 위해 프로파일 데이터를 획득하는 위치는 매크로 시험을 위한 용접 비드의 절단 위치와 동일한 부위이다.

필릿 용접 품질 검사 시스템은 프로파일 데이터 기반으로 용접 품질을 검사한다. 우선 검사하려는 용접 부위에 라인 레이저를 조사한다. 그리고 레이저 비전 센서를 이용하여 검사 대상의 프로파일 데이터를 획득한다. 이 때, 검사 대상의 재질에 따라 카메라의 노출 시

Table 1 Inspection items

Items	Description
Welding Missing	normal missing
Height	
Angle	
Shape (convex/concave)	convex concave

간(exposure time)을 적절하게 설정하여야 한다. 노출 시간이 적정 값보다 작으면 영상에서 레이저 라인 부위의 밝기 값이 부족하여 프로파일 데이터가 누락되는 경우가 발생한다. 반대로 노출 시간이 적정 값보다 크면 레이저 라인의 포화되는 픽셀의 수가 과도하여 라인의 중심점 검출 정확도가 낮아진다. Fig. 4(a)는 라인 레이저를 용접부에 조사하는 실험 환경이다. 카메라를 이용하여 획득한 라인 레이저의 2D 영상은 Fig. 4(b)와 같으며, 2D 영상으로부터 레이저 라인의 중심선을 검출한 것이 Fig. 4(c)이다. 검출된 중심선의 영상 좌표는 3D 캘리브레이션 매개변수를 적용하면 카메라 좌표계 상의 좌표로 변환된다.

프로파일 데이터에서 용접 비드와 모재가 만나는 점을 용접 비드 좌측 경계점, 용접 비드와 부재가 만나는 점을 용접 비드 우측 경계점으로 정의한다. 용접 비드의 검출은 용접 비드의 좌측 경계점과 우측 경계점을 모두 찾는 것을 의미한다. 프로파일 데이터로부터 용접 품질을 검사하는 알고리즘의 블록 다이어그램은 Fig. 5에 나타내었다. 프로파일 데이터에서 용접 모재와 부재의 표면은 직선으로 나타난다. 그러므로 표면 데이터로부터 직선 방정식을 추정하는 것이 첫 번째 단계이다. 직선 방정식의 매개 변수를 추정하기 위해 Fig. 6과 같이 관심 영역(region of interest, ROI)을 모재와 부재 표면에 해당하는 위치에 각각 지정한다. 그리고 각

Fig. 4 Laser profile extraction process; (a) Line laser on the welding bead, (b) 2D image of the line laser and (c) Laser profile

Fig. 5 Block diagram of welding quality inspection algorithm

Fig. 6 Line fitting, (a) ROI region and (b) Line fitting

각의 ROI 내에 존재하는 데이터의 영상 좌표를 이용하여 모재 상의 직선 L1과 부재 상의 직선 L2를 추정한다. 직선을 추정할 때 이상점(outlier)의 영향을 최소화하기 위하여 RANSAC(Random Sample Consensus) 알고리즘을 사용한다. 용접 비드의 좌, 우 경계점은 다음의 방법으로 검출한다.

1) Fig. 7(a)에 나타난 Scan 1의 방향으로 직선 L1과 프로파일 데이터 사이의 거리를 계산하여 거리가 문턱치 $th1$ 보다 커질 때까지 진행한다. 조건을 만족할 경우 중단한다.

2) $x1$ 의 위치에서 Scan 2의 방향으로 직선 L1과 프로파일 데이터 사이의 거리가 문턱치 $th2$ 미만이 될 때까지 진행하여 조건을 만족할 경우 중단한다.

Fig. 7 Welding beads detection, (a) Left point of bead and (b) Right point of bead

3) 스캔을 마친 $(x2, z1)$ 지점이 용접 비드의 좌측 경계점이다.

4) 같은 방법으로 찾은 용접 비드의 우측 경계점은 Fig. 7(b)에 나타난 $(x4, z2)$ 지점이다.

Fig. 8은 용접 비드의 좌, 우측 경계점이 정상적으로 검출된 경우이며, 2개의 경계점 중 하나 또는 모두 검출되지 않은 경우 용접 누락으로 판정한다. 용접 비드의 높이는 Fig. 9에 나타난 것과 같이 모재면 데이터로부터 추정된 직선 L1에서 용접 비드 우측 경계점 $(x4, z2)$ 까지의 최단거리 H 와 같다. 용접 비드의 각도 θ 는 Fig. 9에서 직선 L1과 용접 비드의 좌, 우 경계점을 잇는 직선 L3 사이의 각도이며 벡터의 내적을 이용하여 계산한다. 용접 비드의 형상을 검사하는 방법은 다음과 같다.

1) Fig. 10과 같이 직선 L3 아래의 직각삼각형 A의 넓이 S_A 를 계산한다.

2) 용접 비드가 이루는 곡선 아래의 넓이를 계산한다. 이 때 용접 비드 영역에서 데이터 간의 간격 $\Delta x = 0.05mm$ 이다. 용접 비드 영역의 데이터의 총 개수가 K 이고 $x=k$ 일 때 z 의 값이 $f(x_k)$ 라 하면 영역 B의 넓이는 다음과 같다.

Fig. 8 Detected points of welding beads

Fig. 9 Calculate welding bead's height

Fig. 10 Shape inspection of welding beads

$$S_B = \Delta x \sum_{k=1}^K f(x_k) \quad (1)$$

3) 용접 비드 형상에 대한 판정은 S_A 에 대한 S_B 의 비 $S_{Ratio} = S_B/S_A$ 값이 1보다 작은 경우 오목 형상, 1보다 클 경우 볼록 형상으로 판정한다. $S_{Ratio} = 1$ 이면 설계 형상 A와 같다. 용융 용접에 대한 기술 표준인 MS 스펙에 의하면 실제 목두께는 박판측 판 두께의 1/2 이상이어야 하며, 보강 덧붙임 두께는 각장의 50% 이내가 정상 기준이다. 본 검사 시스템은 $S_{Ratio} \geq 1$ 이면 양품, 그 외에는 불량으로 판정한다.

2.3 검사 성능 검증 방법

용접 품질 검사 시스템의 검사 성능 검증을 위하여 Table 2에 나타낸 것과 같이 각각의 용접 비드 치수를 설계하고 Fig. 11(a)와 같이 용접 비드의 3D 모델링을 설계한다.

Table 2 Specimen specification

No.	Height	Angle	Reinforcement
1	4.5mm	40°	0.5mm
2	5.0mm	45°	1.0mm
3	3.5mm	40°	-0.5mm
4	4.0mm	45°	0.0mm

Fig. 11 Specimen for evaluation; (a) Specimen design and (b) Inspection point

3. 실험 및 고찰

실험에 사용된 카메라는 Fig. 12(a)와 같다. 카메라의 해상도는 가로, 세로 2048×1088이며 화소의 크기는 가로, 세로 0.0055mm로 동일하다. 카메라 내부에는 프로파일을 검출하는 알고리즘을 포함하고 있어 사용자는 카메라의 출력을 2D 영상과 프로파일 데이터 중에서 선택할 수 있다. 카메라에 장착하는 렌즈는 Computar사의 M2518-MPW2이다. 이 렌즈는 초점거리가 25mm이다. 실험을 위해 조리개를 조정하여 동작 거리 (working distance, WD) 180mm와 220mm 사이에서 초점이 맺히도록 설정한다. Fig. 12(b)의 라인 레이저 모듈은 MV micro사의 FP-Mvnano-660-70M30-F200-TS이다. 레이저의 파장은 660nm이며 팬 각도(fan angle)는 30도이다. 레이저 비전 센서를 구성하기 위해 카메라와 라인 레이저를 고정할 수 있는 브라켓을 제작하여 일체화한다.

레이저 비전 센서를 회전 이송하기 위해 사용하는 전동 로터리는 스텝 모터를 사용한다. 스텝 모터는 산업 현장에서 요구되는 검사 시간과 정밀도를 만족하기 위해 SMC사의 고정도 타입 제품을 선정한다. 모터의 상세한 사양은 Table 3과 같다. 제작한 레이저 비전 센서를 스텝 모터에 장착하여 구성한 실험 환경은 Fig. 13과 같다.

레이저 비전 센서를 사용하여 획득한 2D영상 및 프로파일 데이터로부터 3D 카메라 캘리브레이션을 수행

Fig. 12 Laser vision sensor parts; (a) 3D camera and (b) Line laser module

Table 3 Stepper motor specification

Item	Specifications
Max. rotating torque	10 Nm
Speed	20~280 degree/sec
Max. cceleration/deceleration	3,000 degree/sec2
Backlash	±0.1 degree
Positioning repeatability	±0.03 degree
Rotation angle	360°
Weight	2.4kg
Power	24V DC

Table 4 3D camera calibration result

Item	Calibration result
Intrinsic parameter	$A = \begin{bmatrix} 5075.883 & 0 & 1050.055 \\ 0 & 5075.8828 & 536.431 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
Distortion coefficients	$K = (-0.199, 1.985, 0, 0)$
Laser plane equation coefficients	$a = -0.000076$ $b = 0.012273$ $c = -0.005258$ $d = 1$
alpha	1.288383 (radian)

Fig. 13 Laser vision sensor

하여 추정된 매개 변수는 Table 4와 같다. 여기서

$$A = \begin{bmatrix} \alpha \gamma u_0 \\ 0 \beta v_0 \\ 0 0 1 \end{bmatrix}$$

는 카메라 내부 매개변수(intrinsic parameter)이다. 카메라 내부 매개변수는 카메라의 가로, 세로 방향의 초점 거리를 의미하는 α , β , 영상 센서의 종횡비(aspect ratio)를 의미하는 γ , 광축과 영상 센서가 만나는 광점(optical point) (u_0, v_0) 로 구성된다. 왜곡 모델 계수 K 는 렌즈에 의한 방사 왜곡 계수 (k_1, k_2)와 카메라 제조 과정에서 영상 센서 부착 시에 발생하는 접선왜곡 계수 (p_1, p_2)로 구성된다. 레이저 평면 방정식 계수는 카메라 좌표계 상에서 라인 레이저가 만드는 평면($ax + by + cz + d = 0$)의 방정식 계수이다. 그리고 alpha는 배경 평면과 레이저 평면 사이의 각이다¹⁰⁾.

Table 5는 추정된 매개 변수를 적용하여 기준면과 게이지 블록(gauge block)의 높이를 측정한 값을 나타내었다. 게이지 블록은 길이 방향에 대해서 신뢰성을 검증받아 길이 측정의 표준이 되는 게이지로 게이지 블록을 수직 방향으로 세워서 높이 측정 검증에 사용하였다. 서로 다른 게이지 블록 4개의 높이를 측정한 결과

Table 5 Gauge block measurement result

Gauge block	25mm	18mm	14mm	12mm
Avg. (mm)	24.944	17.978	14.013	12.035
Std. deviation (mm)	0.097	0.0865	0.067	0.0698
Error (mm)	0.056	0.022	0.013	0.035

Fig. 14 Specimen **Fig. 15** Image processing result

측정 오차는 0.013mm에서 0.056mm이며 평균 측정 오차는 0.0315mm 이다. 아크 용접이 적용되는 부위의 용접 각장은 일반적으로 3mm 이상이며 산업 현장에서는 이보다 더 여유를 두고 관리한다. 그리고 산업 현장에서 용접 비드의 높이 또는 용접 덧붙임 두께를 측정하는데 주로 사용하는 용접 비드 측정 게이지는 눈금이 1mm단위이다. 따라서 본 레이저 비전 센서는 아크 용접부위의 치수를 측정하기에 적합함을 알 수 있다.

Table 2에서 제시한 사양으로 Fig. 14와 같이 검증용 시편을 제작하였다. Fig. 15는 프로파일 데이터로부터 검사 알고리즘을 이용해서 시편의 용접 비드 형상을 측정한 결과 영상이다. 미리 지정한 ROI 내에서 부재의 측면부와 모재의 바닥면 직선을 각각 추정하여 영상에 표시하였다. 프로파일 데이터로부터 용접 비드의 좌, 우 경계점을 검출한 후 비드의 폭과 높이, 각도, 보강 덧붙임 양을 계산한 결과는 영상의 좌측 상단에 표

Table 6 Experiment results

No.	Description	Ref. value	Measures	Std. deviation	Error	Missing result
1	Height	4.5mm	4.467	0.068	0.033	100
	Angle	40°	41.139	0.368	1.139	
	Reinforcement of weld	0.5mm (convex)	13.248	0.813	N/A	
2	Height	5.0mm	4.995	0.015	0.005	100
	Angle	45°	44.640	0.965	0.36	
	Reinforcement of weld	1.0mm (convex)	30.178	1.430	N/A	
3	Height	3.5mm	3.173	0.100	0.327	100
	Angle	40°	42.647	0.446	2.647	
	Reinforcement of weld	-0.5mm (concave)	-15.829	1.475	N/A	
4	Height	N/A	0mm	0mm	0mm	0
	Angle	N/A	0°	0°	0°	
	Reinforcement of weld	N/A	0%	0%	N/A	

Table 7 Detection accuracy formula

Result \ Fact	Welding bead Exist (TRUE)	Welding bead not Exist (FALSE)
Welding bead Exist (POSITIVE)	(TP)	(FP)
Welding bead not Exist (NEGATIVE)	(TN)	(FN)
Accuracy = ((TP+FN)/(TP+TN+FP+FN))*100		

시하였다. 검사 위치 당 100회 반복 측정하고 평균값을 계산하여 Table 6에 정리하였다. 평균 측정 오차는 0.122mm 이다. 검사위치 3번의 경우 오목한 비드 형태를 검출하는 과정에서 오차가 다른 부위에 비해 크게 나타난다. 이는 용접 비드의 경계점을 검출할 때 추정된 직선과 데이터와의 거리가 문턱치 th_2 이하가 되는 지점을 검출하게 되는데 경사가 매우 완만할 경우 검출 오차가 크게 나타난 것으로 분석된다.

Table 6의 결과에 의하면 용접 비드가 존재하는데 비드가 존재한다고 판단한 TP = 300, 용접 비드가 존재하는데 없다고 판단한 TN = 0, 용접비드가 존재하지 않는데 비드가 존재하지 않는다고 판단한 FN = 100, 용접비드가 존재하지 않는데 비드가 존재한다고 판단한 FP = 0이다. 따라서 검출 정확도는 Table 7의 식에 의해서 100% 이다.

Fig. 16은 실제 생산 현장에서 생산된 제품에 대한 검사 결과 영상이다. 용접 비드 표면의 난반사로 인해 프로파일 데이터가 일부 누락이 되었으나 제시한 방법으로 용접 비드의 경계를 검출하는데 문제가 없음을 확

Fig. 16 Image processing result of product

인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 필릿 용접부의 결함을 검사하기 위한 검사 알고리즘을 제안하고 레이저 비전 센서 기반 필릿 용접 품질 검사 시스템을 구현하였다. 시스템의 검사 성능 검증을 위하여 필릿 용접부를 모사한 시편을 정밀 가공하여 제작하였다. 제안한 검사 알고리즘이 생산 현장에서 필요로 하는 주요 검사항목을 효과적으로 검출하는 것을 실험 결과로 확인하였다. 용접 비드가 오목한 형상일 경우 비드 높이에 대한 측정 오차가 크게 나타나는 것은 추후 연구를 통해서 알고리즘을 개선해야 할 부분이다.

ORCID: Ui-Tae Jeong: <http://orcid.org/0000-0002-9556-6503>
 ORCID: Hyeong-Jun Lee: <http://orcid.org/0000-0001-5185-5277>
 ORCID: In-Soo Lee: <http://orcid.org/0000-0001-9773-4710>

References

1. S. H. Yun, H. J. Kim and S. G. Kim, Development of Welding Quality Inspection System for RV Sinking Seat, *J. Institute of Control, Robotics and Systems*, 14 (1) (2008), 75-80
<https://doi.org/10.5302/j.icros.2008.14.1.075>
2. S. K. Kim, Welding bead inspection By Vision System, *The Korean Society Of Automotive Engineers Symposium*, (2003), 97-101
3. E. G. Kim and I. M. Park, A Study on Technology for Automatic Inspection of Welding Faulty of Vessel's Parts, *J. The Korean Society of Industry Convergence*, 17 (4) (2014), 255-264
4. S. M. Kim, Y. C. Lee and S. C. Lee, Vision Based Automatic Inspection System for Nuts Welded on the Support Hinge, *J. Institute of Control, Robotics and Systems*, (2006), 1508-1512
<https://doi.org/10.1109/sice.2006.315371>
5. C. H. Kim, H. Y. Yu, S. H. Hong and J. Y. Kim, A Study on Construction of Automatic Inspection System for Welding Flaws, *J. the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 16 (6) (2007), 37-42
6. S. H. Yun, H. J. Kim and S. G. Kim, Development of Stereo Vision Based Welding Quality Inspection System for RV Sinking Seat, *J. the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 17 (3) (2008), 71-77
7. W. Huang and R. Kovacevic, Development of a real-time laser-based machine vision system to monitor and control welding processes, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 63 (1-4) (2012), 235-248
<https://doi.org/10.1007/s00170-012-3902-0>
8. Z. Qu, A. Bennecer, C. Selcuk and T. H. Gan, Development of a laser-based weld flaw identification system, *Conference of British Institute of Non-Destructive Testing*, (2012), 21-29
9. J. I. Lee and S. H. Rhee, A Study of Inspection of Weld Bead Defects using Laser Vision Sensor, *Journal of KWS*, 17 (2) (1999), 53-60
10. J. S. Lee, P. J. Im, Y. J. Park and J. H. Kim, Inspection System of Welding Bead and Chamfer by means of Laser Vision, *J. Institute of Control, Robotics and Systems*, (2001), 2166-2169
11. G. E. Sung, H. J. Lee, S. H. Lee, H. S. Park and Y. G. Oh, The automation of welding and inspection for a curved surface thin plate using 3D laser vision sensor, *Conference of the Korean Welding and Joining*, (2001), 71-74
12. H. J. Lee and S. H. Lee, A study of bead shape inspection using laser vision sensor in GMA welding process, *Conference of the Korean Welding and Joining*, (2002), 218-221
13. U. T. Jeong, I. S. Jo, H. J. Lee and I. S. Lee, Development of Simplified 3D Camera Calibration Algorithm For 3D Vision Inspection System, *The institute of electronics engineers of Korea Symposium*, (2017), 613-616