
영상처리를 이용한 용접부 결함의 자동 검출

김은석 · 주기세* · 장복주* · 강경영*

Detection of Defects on Welding Area Using Image Processing

Eun Seok Kim · Ki See Joo* · Bog Ju Jang* · Kyeang Yeong Kang*

요 약

본 논문에서는 용접부에 존재하는 결함을 자동으로 검출하기 위해서 영상처리 알고리즘을 이용한다. 용접부는 조명에 민감하고 패턴이 불규칙해서 검출에 어려움이 있다. 그래서 두 가지 조명 조건으로 영상을 획득하고 2차에 걸쳐 알고리즘을 적용한다. 1차 알고리즘은 첫 번째 영상을 몇 개의 ROI로 분할한 후, 분할된 영역들 간의 명암도 분포의 유사도를 비교한다. 2차 알고리즘은 두 번째 영상에서 경계 정보를 검출하고 경계선 길이, 곡률, 기준선 범위를 계산한다. 제안한 알고리즘을 이용하여 실험한 결과 결함 검출과 분류에 뛰어난 성능을 보였다.

ABSTRACT

In this paper, we use image processing algorithms to detect the defects existed on a welding area automatically. It is difficult to detect the welding defects because it is sensitive to lights and has irregular patterns. For this reason, images are captured with 2 kinds of illumination condition, and are processed by 2 different algorithms for each image. The first algorithm separates some ROI's from the captured image and compares the similarity of intensity between each divided region. The second algorithm extracts boundary information from the processed image by the first algorithm, and calculates the length of boundary, curvature and base line area based on boundary information. The proposed method showed high performance in detection and classification of defects.

키워드

용접결함, 경계검출, 영역분할, 명암도분포

I. 서 론

오늘날 용접은 자동차, 조선, 건축 등의 분야에서 광범위하게 사용되고 있으며 그 중요도는 계속 증가하고 있다. 그래서 품질 향상을 위한 새로운 용접 시공 방법들이 끊임없이 연구되고 용접 결함을 없애기 위한 용접검사 기술이 나날이 발전되고 있다.

용접검사는 표면검사와 내부검사가 있다. 육안검사는 표면검사로, 용접부위의 표면만을 검사하기 때문에 내부 결함은 알 수가 없으며, 검사자가 직접 판단하기 때문에 오판이 날 경우도 발생한다. 내부검사는 방사선 검사와 초음파 검사가 있다. 초음파 검사는 방사선 검사에 비해 저렴하고 방사선에서 발견되지 않는 결함도 찾을 수 있다는 장점이 있다. 그러나 초음파 검사는 검사원의 기록에 의존한다는 단점이 있다.

용접결함에서 구조상의 결함은 용접 균열(welding crack), 기공(blowhole), 스패터(splatter), 언더컷(undercut), 오버랩(overlap), 용입불량, 슬래그 섞임이 있다. 용접 균열은 용접부에 균열이 생긴 경우로 작은 균열이라도 점점 커지면서 구조물의 파괴를 가져 온다. 기공은 용착 금속 안에 가스가 남아 구멍이 생기는 현상이다. 스패터는 용접 중 용융 금속에서 기포나 용적이 폭발할 때 용융 금속이나 슬래그가 비산하여 발생한다. 언더컷은 모재와 비드의 경계 부분에 홈이 생기는 현상이다. 오버랩은 녹는 금속이 모재와 완전히 용착되지 않고 덮일 때 발생한다. 슬래그 섞임은 용착 금속 안에 모재나 모재와의 용합부에 슬래그가 남아 있는 경우 발생한다.

기존의 영상처리와 관련된 용접 자동화 연구는 방사선 비파괴검사(Radiographic Testing) 필름으로 용접부의 결함을 검출하고 용접 이음새의 추적에 관한 연구와 [1][2] 용접 이음부 외부결함 자동검출 및 분류에 관한 연구가 [3] 있다.

본 연구에서는 육안검사를 자동화하기 위해서 머신 비전을 이용하여 용접 결함을 검사한다. 용접부가 조명에 민감하게 반응하고 결함 유무에 대한 패턴이 불규칙하기 때문에 용접 결함의 판별과 분류는 정확한 검사를 위해 2차에 걸쳐서 실시하였다. 1차 검사는 용접부 표면의 결함 유무를 판별하기 위한 것으로, 용접부를 세분화하여 유사 명암 분포를 갖는 영역을 그룹핑하였다. 2차 검사는 용접부 경계 부위의 결함을 판별하기 위해서, 조명으로 경계 부위를 부각시킨 후 경계선을 검출하고 경

계선 길이, 곡률, 검사 기준선 범위를 계산하였다.

II. 시스템 구성

본 연구에 사용된 실험장치의 구성은 그림 1과 같으며, CCD 카메라와 할로겐램프를 사용하여 용접부의 영상을 획득한다. 용접 결함의 유무 판별을 두 번에 걸쳐서 실시하므로 조명 조건을 변화시켜 두 장의 영상을 획득하였다. 첫 번째 영상은 용접부 전체의 명암 분포를 검사해야 하기 때문에 조명을 분산시켜서 얻는다. 그리고 두 번째 영상은 용접부 경계선을 검출해야 하기 때문에 조명을 용접부에 집중시켜서 획득한다.



그림 1. 실험 장치
Fig. 1 The test device

III. 결함 검출 알고리즘

3.1 1차 검출 알고리즘

1차 검출 알고리즘은 용접부 표면의 결함 유무를 판별하기 위한 방법으로, 조명이 분산된 첫 번째 영상을 세분화하여 유사 명암 분포를 갖는 영역을 그룹핑해서 그 그룹 개수로부터 결함의 유무를 분류한다. 여기서 사용된 영상은 흑백영상으로 해상도가 558*107이고 그레이 레벨이 8비트이다. 알고리즘 절차는 다음과 같다. 그림 2는 1차 결함검출 알고리즘의 구성도를 나타내고 있다.

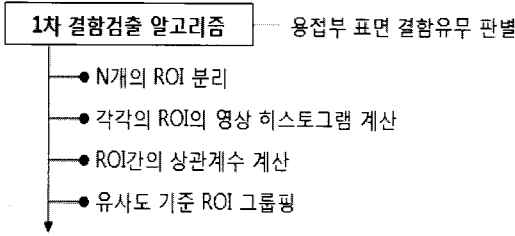


그림 2. 1차 검출 알고리즘 구상도
Fig. 2 Structure of the first detection algorithm.

우선, 영상을 N개의 ROI(Region Of Interest)로 분리한다. 그리고 각각의 ROI에서 영상의 밝기 값에 대한 영상 히스토그램을[4][5] 식(1)을 이용하여 구하고 분포에 대한 평균과 분산을 식 (2)와 (3)을 이용하여 구한다.

$$p(k) = \frac{n_k}{n1 \times n2}, \quad k = 0, 1, \dots, 255 \quad (1)$$

$$\mu = \sum_{k=0}^{255} (kp(k)) \quad (2)$$

$$\delta^2 = \sum_{k=0}^{255} (k-\mu)^2 p(k) \quad (3)$$

여기서, n_k : ROI에서 영상 밝기 레벨에 해당하는 개수
 $n1$: ROI 가로 크기
 $n2$: ROI 세로 크기

두 번째로 각각의 ROI간에 상관계수를 식(4)를 이용하여 구한다. 여기서, 상관계수를 구할 때 계산 속도를 빠르게 하기 위해서 히스토그램 평균기준 가우시안 분포의 6δ 범위에서 구한다. 여기서, 평균기준 가우시안 분포의 $\pm 6\delta$ 범위는 ROI내의 주요 밝기 값을 포함한다.

$$r_{ij} = \frac{\sum (x_{ik} - \bar{x}_i)(y_{jk} - \bar{y}_j)}{\sqrt{\sum (x_{ik} - \bar{x}_i)^2 \sum (y_{jk} - \bar{y}_j)^2}} \quad (4)$$

여기서,

r_{ij} : i번째 ROI와 j번째 ROI간의 상관계수

x_{ik}, y_{jk} : i, j번째 ROI의 영상 히스토그램

($-6\delta < k < 6\delta$)

\bar{x}_i, \bar{y}_j : i, j번째 ROI의 영상 히스토그램 평균

세 번째로 식(5)를 이용하여 각각의 ROI간의 상관계수를 비교해서 그룹핑한다. 그룹핑하는 방법은 우선, 첫 번째 ROI를 그룹 0으로 인덱스한다. 그리고 두 번째 ROI부터 이전 ROI와 상관계수를 비교해 가면서 상관계수가 가장 큰 값을 갖는 ROI를 찾는다. 만약 가장 큰 상관계수가 유사도(α)보다 크면 동일 그룹으로 레이블링(labeling)하고 유사도보다 적으면 새로운 그룹을 생성한다. 그림 3은 그룹화 과정을 나타낸다[6][7].

$$G_j = \begin{cases} G_n & \text{if } r_{kj} = \max(r_{0j}, r_{1j}, r_{2j}, \dots, r_{j-1,j}) < \alpha \\ G_k & \text{if } r_{kj} = \max(r_{0j}, r_{1j}, r_{2j}, \dots, r_{j-1,j}) \geq \alpha \end{cases} \quad (5)$$

G_j : j번째 ROI의 그룹($0 < j < N$)

r_{kj} : k번째 ROI와 j번째 ROI간의 상관계수

G_k : k번째 ROI의 그룹($0 \leq k < n$)

G_n : 새로 생성된 그룹

n : 최대 그룹 수($n < N$)

α : 유사도

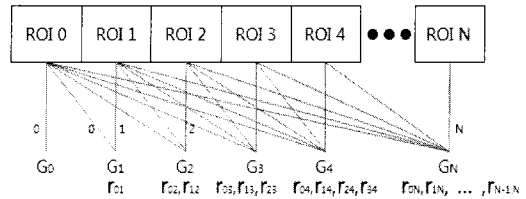


그림 3. 그룹화 과정
Fig. 3 Grouping process

여기서, 그룹 수는 유사도에 따라 달라진다. 유사도가 60%이하이면 결함이 존재하는 영상에서도 그룹 수가 한 개가 돼서 결함이 없는 영상과 구별이 안 된다. 유사도를 80%이상으로 했을 경우 그룹 수가 6개 이상이면 ROI간에 영상 밝기 분포 변화가 심하므로 결함이 존재하는 경우이다. 그리고 그룹 수가 6개 미만이면 ROI간에 영상 밝기 분포 변화가 거의 없으므로 결함이 없거나 언더컷이 발생된 경우이다.

3.2.2차 검출 알고리즘

2차 검출 알고리즘은 용접부 경계에 존재하는 결함을 검출하는 방법이다. 그림 4는 2차 검출 알고리즘의 구상도를 나타내고 있다. 이 방법은 용접부 경계선을

부각시킨 두 번째 영상으로부터 그림 5에 표현되어 있는 위/아래쪽 용접 경계선 좌표를 찾고 경계선 길이, 곡률, 검사 기준선 범위에서 결함을 찾는다. 알고리즘은 다음과 같다.

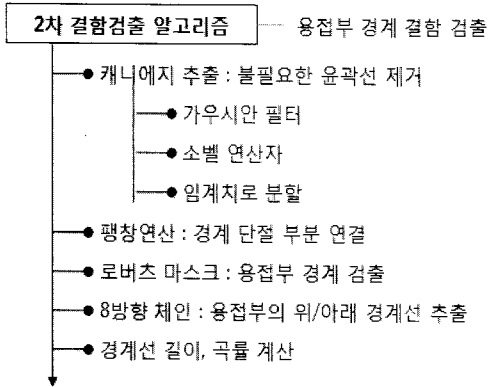


그림 4. 2차 검출 알고리즘 구성도
Fig. 4 Structure of the second detection algorithm.

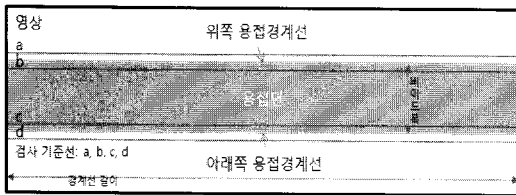


그림 5. 용접부 영상의 용어 표현
Fig. 5 Description of terms in weld zone image.

우선, 경계선 좌표를 찾기 전에 경계선 주위에 불필요한 윤곽선 제거와 경계선을 부각시킨다[8][9]. 이를 위해서 첫 번째는 노이즈로부터 잘못된 에지를 계산하는 것을 방지하기 위한 캐니에지 추출 방법을 사용한다. 캐니에지 추출은 3단계로 이루어지며, 1단계는 가우시안 필터링을 이용하여 영상을 스무딩(smoothing)하고 2단계에서 소벨 연산자로 에지를 검출한다. 그리고 3단계에서 임계치를 이용하여 불필요한 윤곽선을 제거한다.

두 번째는 팽창연산을 하여 캐니에지 검출기로 찾은 경계의 단절된 부분을 연결해준다. 마지막으로 로버츠 마스크를 사용하여 용접부의 경계를 검출한다.

0	0	-1	-1	0	0
0	1	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0

(a) row (b) column

그림 6. 로버츠 에지 검출 마스크
Fig. 6 Roberts edge detector masks

1	0	-1	-1	-2	-1
2	1	-2	0	0	0
1	0	-1	1	2	1

(a) row (b) column

그림 7. 소벨 에지 검출 마스크
Fig. 7 Sobel edge detector masks

다음으로, 8방향 체인을 이용하여 용접부의 위/아래 경계선 좌표를 추출한다. 그림 8은 8방향 체인을 나타내고 있다. 마지막으로, 추출된 경계선 좌표로 용접 결함을 찾기 위해 위/아래 경계선 길이 L 을 식(6)을 이용하여 구한다. 경계선 길이가 너무 짧으면 언더컷이 발생한 경우이고 너무 길면 오버랩과 슬래그 섞임이 발생한 경우이다.

그리고 위/아래 경계선의 점들에 대해서 곡률을 식(7)을 이용하여 구한다. 위빙 비드가 일정한 간격으로 만들어지기 위해선 곡률 크기가 일정 구간별로 값이 변해야 한다. 곡률 크기가 '0'으로 여러 구간 지속되면 위빙 비드가 존재하지 않는다는 것을 의미한다.

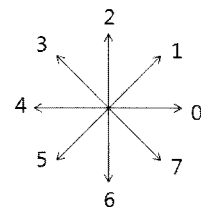


그림 8. 8방향 체인
Fig. 8 An 8-connected chain.

$$L = \sum_{i=1}^N n_i \tag{6}$$

$$n_i = \begin{cases} 1 & \text{if } x_i = 0, 2, 4, 6 \\ \sqrt{2} & \text{if } x_i = 1, 3, 5, 7 \end{cases}$$

x_i : i 번째 체인코드

$$|k(n)| = \frac{1}{\Delta^2} \sqrt{[x(n-1) - 2x(n) + x(n+1)]^2} + \frac{1}{\Delta^2} \sqrt{[y(n-1) - 2y(n) + y(n+1)]^2} \quad (7)$$

$|k(n)|$: 곡률의 크기

Δ : 샘플링 간격

$x(n), y(n)$: n 번째 경계의 x, y 좌표

위에서 구한 경계선 길이가 짧은 경우를 제외하고 검사 기준선의 범위를 조사한다. 기준선을 따라 검색하다가 위/아래쪽 경계선과 교차하는 지점이 발견되면 체인코드로 결함 범위를 알아낸다. 검사 기준선의 범위를 벗어나면 오버랩과 언더컷이 발생한 경우이다. 그림 5에서 처럼 기준선 a보다 위쪽 경계선이 적은 경우와 기준선 d보다 아래쪽 경계선이 적은 경우에는 오버랩이 발생한 경우이다. 그리고 기준선 b보다 위쪽 경계선이 큰 경우와 기준선 c보다 아래쪽 경계선이 큰 경우에는 언더컷이 발생한 경우이다. 언더컷이 발생했을 경우 결함 영역의 새로 길이가 길면 골짜기가 형성된 경우이므로 용접속도가 불규칙한 경우이다.

IV. 실험결과

본 연구에서는 용접 결함의 영상 획득을 위해 PULNiX TM-7AS 단색 카메라, 16mm렌즈, Matrox 이미지보드, Moritex MHF-M1002 할로겐 조명 소스를 사용하였다. 그리고 영상처리를 위해서 윈도우 XP환경에서 Visual Studio 2005를 이용하여 개발하였다.

1차 검출 알고리즘으로부터 용접부 표면의 결함 유무 판별을 실험하기 위해서, 첫 번째 조명 조건으로 그림 9와 같은 다양한 결함을 갖는 영상을 획득하였다. 그림 10은 각각의 영상에 대한 유사도에 따른 그룹 수를 나타내고 있다. 결함1과 결함7은 명암도 분포의 변화가 많아서 유사도가 적어도 그룹이 분류됨을 알 수 있다. 그리고 유사도가 70% 이상 일 경우에 그래프가 급상승하여 결함

의 분류가 잘 됨을 알 수 있다. 표 1은 유사도가 70%일 때 그룹 수를 나타내고 있다.

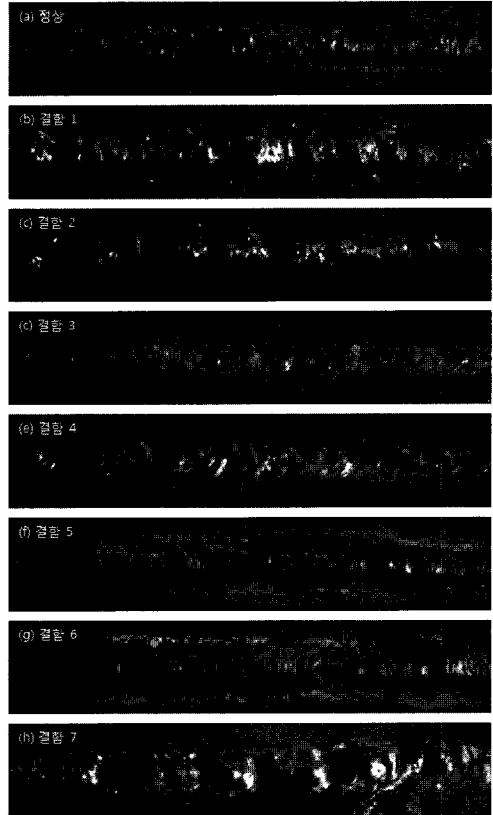


그림 9. 1차 조명 조건으로 획득한 용접부의 결함 영상
Fig. 9 The defect detection of weld zone captured by the first illumination condition.

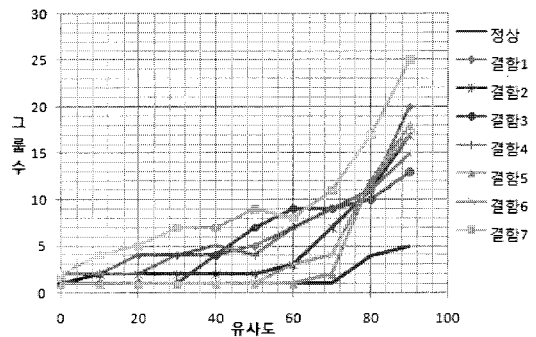


그림 10. 결함 영상별 유사도 변화에 따른 그룹 수
Fig. 10 The group number with different similarity for each defect image.

표 1. 결함 영상별 최대 그룹 수(유사도:70%)
 Table. 1 The maximum number of groups for each defect image. (Similarity:70%)

종류	결함 명	최대 그룹수
정상	-	1
결함1	오버랩, 위빙 비드 없음	9
결함2	용접속도 불규칙, 아크길이 짧음	7
결함3	위빙 비드 없음, 언더컷	9
결함4	언더컷, 비이드 폭 좁음	9
결함5	언더컷	2
결함6	언더컷, 오버랩	4
결함7	전류 높음, 전압 높음	11

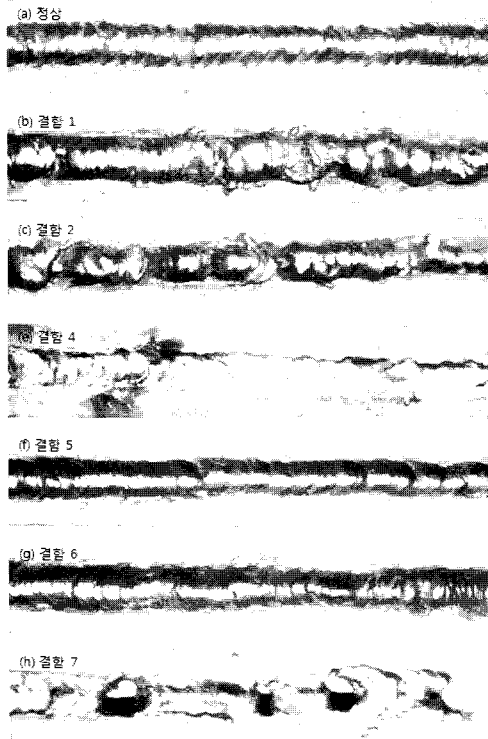


그림 11. 2차 조명 조건으로 획득한 용접 결함 영상
 Fig. 11 The defect detection of weld zone captured by the second illumination condition.

2차 검출 알고리즘으로 용접 불량을 판별하기 위해서, 두 번째 조명조건으로 그림 11과 같은 경계선이 부

각된 영상을 획득하였다. 경계선의 불필요한 윤곽선과 노이즈를 제거하기 위해서 캐니에지 검출 방법, 영상 팽창, 로버츠 마스크를 순차적으로 적용한 후 체인코드 알고리즘을 이용하여 용접부의 위/아래 경계선 좌표를 찾는다. 그림 12는 각각의 영상에 대한 경계선과 검사 기준선을 보여주고 있다. 각각의 영상에 대해서 경계선의 길이를 계산하면 표 2와 같은 결과가 나온다. 결함 2는 위쪽 경계선 길이가 매우 길어서 오버랩과 용접속도 불규칙의 결함이 발생한 경우이고, 결함 3, 4, 7은 위쪽과 아래쪽 경계선 길이가 매우 짧아서 언더컷이 발생한 경우이다.

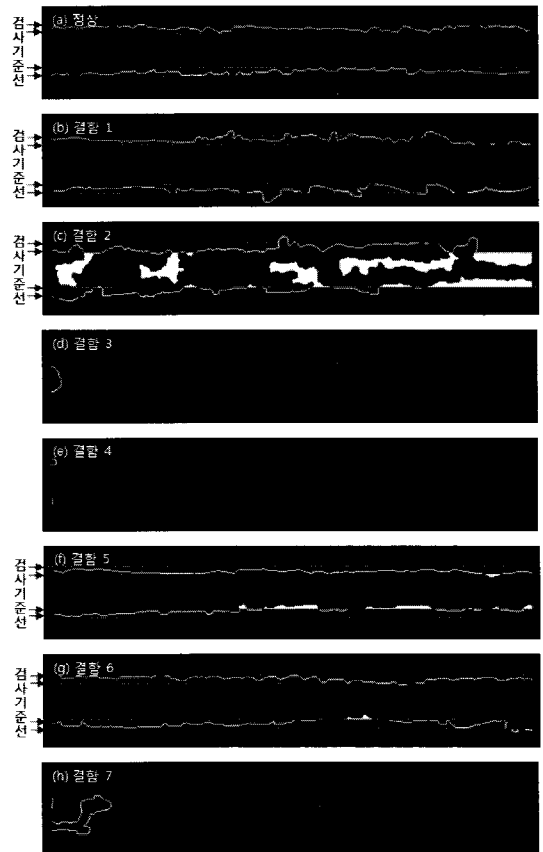


그림 12. 영상들에 대한 경계선과 검사 기준선
 Fig. 12 The inspection baselines and boundary of welding zone for each defect image.

표 2. 위/아래쪽 경계선 길이
Table. 2 The upper and lower boundary lengths.

종류	위쪽 경계선 길이(L)	아래쪽 경계선 길이(L)	구분
정상	600.26	608.29	정상
결함1	640.45	642.78	정상
결함2	1322.43	797.32	결함
결함3	42.21	42.21	결함
결함4	15.24	7.4	결함
결함5	566.99	591.69	정상
결함6	587.22	613.32	정상
결함7	13.83	208.95	결함

다음으로 경계선의 점들에 대한 곡률을 계산한다. 위빙 비드 간격이 일정하기 위해선 경계선을 따라 곡률 크기가 주기적으로 변해야한다. 그림 13은 불량 1에 대한 위/아래쪽 경계선의 곡률크기를 나타낸 것이다. 위쪽 경계선의 49에서 82까지의 범위와 아래쪽 경계선의 44에서 72까지의 범위 점들이 '0'으로 동일함을 알 수 있다. 이런 경우 위빙 비드 간격이 매우 크거나 없어서 결함에 해당한다.

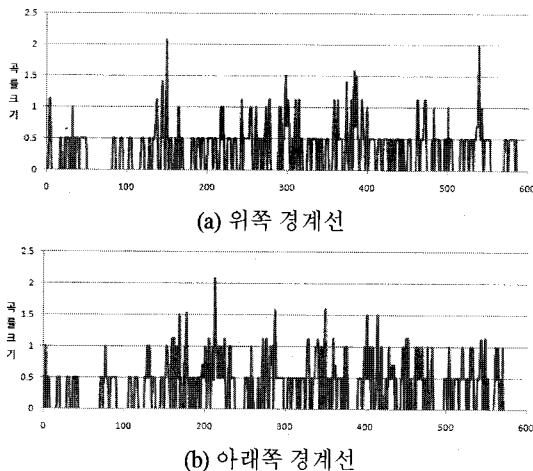


그림 13. 결함1의 위/아래쪽 경계선의 곡률크기
Fig. 13 The curvature of the upper and lower boundary for the first defect image.

마지막으로 경계선 길이가 정상인 영상을 대상으로 검사 기준선의 범위를 조사해서 언더컷, 오버컷, 용접속도 불규칙을 찾는다. 결함 1, 2는 검사 기준선 a, d의 범위

를 벗어났으므로 오버컷이 발생한 경우이며 결함 5, 6은 검사 기준선 b, c의 범위를 벗어났으므로 언더컷이 발생한 경우이다. 그리고 결함 2는 검사 기준선 b, c의 범위를 벗어났고 안쪽으로 많이 들어가서 용접속도가 불규칙한 경우이다.

V. 결론

기존에 육안으로 이루어지던 용접 표면검사를 자동화하기 위해서 영상처리 알고리즘을 적용하여 용접 결함의 판별과 분류를 하였다. 모재가 조명에 민감하고 결함 유무에 대한 패턴이 불규칙하기 때문에 두 가지 조건에 조명과 알고리즘을 적용하였다. 첫 번째 알고리즘에서 용접부 표면의 명암도 분포를 비교하여 그룹핑하였다. 대부분의 결함 유무는 첫 번째 알고리즘에서 판별이 가능하였다. 두 번째 알고리즘은 용접 경계선을 찾아서 경계선 길이, 곡률, 검사 기준선의 범위를 계산하였다. 두 번째 방법에서 세부적인 결함의 분류가 가능했다.

향후에는 용접 작업을 실시간으로 검사하여 작업자의 용접상태를 파악하여 전압, 전류, 속도를 자동으로 제어할 수 있도록 할 계획이다.

참고문헌

- [1] K. Inoue : "Image Process for On-Line Detection of Welding Process," Journal of the Japan Welding Society, Vol. 50, No. 3, pp.18-25, 1981.
- [2] K. Enami : "Progress of non destructive testing techniques for power plant components," Journal of the Japan Welding Society, Vol. 65, No. 8, pp.633-647, 1996.
- [3] Seo, Won-Chan, "Weld Defects Detection and Classification System for Robot Welding," PUKYOUNG NATIONAL UNIVERSITY, Vol. 7, pp.253-260, 2002.
- [4] A. Papoulis, Probability, Random Variables and Stochastic Processes, McGraw-Hill, 1965.
- [5] Anil K. Jain, Fundamentals of Digital Image Processing, Prentice-Hall, 1989.

[6] M.D. Levine, Vision in Man and Machine, McGraw-Hill, 1985.

[7] H. Sammet, The design and analysis of spatial data structures, Addison-Wesley, 1990.

[8] N. Nikolaidis and I. Pitas, "Nonlinear processing and analysis of angular signals," IEEE Trans. on Signal Processing, Vol. 46, No. 12, pp.3181-3194, December 1998.

[9] I. Pitas, A.N. Venetsanopoulos, Nonlinear digital filters: Principles and applications, Kluwer Academic, 1990.



강경영 (Kyeong Yeong Kang)

1987년 2월: 원광대학교
식품영양학과(이학사)
2001년 2월: 목포해양대학교 해상
운송시스템학과(공학석사)

1996년 - 현재: (주)광양해운 대표
※관심분야: 신호처리, 통신 시스템, 물류 자동화

저자소개



김은석(Eun Seok Kim)

1999년 대불대학교 산업공학과
(공학사).
2001년 목포해양대학교(공학석사)
2006년 아주대학교(공학박사)

2004년~2005년 (주)이알하우스 연구원
2005년 ~ 2007년 제노시스(주) 연구원
※관심분야: 영상처리, 제어계측, 유비쿼터스



주기세 (Ki See Joo)

1988년 2월: 한양대학교
산업공학과 (공학사)
1992년 2월: Texas A&M Univ.
산업공학과(공학석사)

1996년 2월 고려대학교 산업공학과(공학박사)
1997년 3월 - 현재: 목포해양대학교 해상운송시스템학
부 정보시스템 전공 교수
※관심분야 : 영상처리, 물류자동화, 통신 시스템



장복주 (Bog Ju Jang)

1995년 2월 : 조선대학교
기계공학과(공학사)
1998년 2월: 세명대학교 전자계산
교육학과(공학석사)

2006년 8월: 목포해양대학교 정보시스템전공 박사과
정 수료
※관심분야: 신호처리, 물류자동화, 통신시스템