

비전센서를 이용한 다층 용접선 추적 시스템

이정익*, 고병갑†

(논문접수일 2006. 8. 18, 심사완료일 2007. 3. 6)

The Multipass Joint Tracking System by Vision Sensor

Jeongick Lee*, Byungkab Koh†

Abstract

Welding fabrication invariably involves three distinct sequential steps: preparation, actual process execution and post-weld inspection. One of the major problems in automating these steps and developing autonomous welding system is the lack of proper sensing strategies. Conventionally, machine vision is used in robotic arc welding only for the correction of pre-taught welding paths in single pass. However, in this paper, multipass tracking more than single pass tracking is performed by conventional seam tracking algorithm and developed one. And tracking performances of two algorithm are compared in multipass tracking. As the result, tracking performance in multi-pass welding shows superior conventional seam tracking algorithm to developed one.

Key Words : Joint Tracking System(용접선 추적 시스템), Multipass Arc Welding(다층 아크 용접), Vision Sensor(시각 센서), Welding Fabrication(용접 구조물), Post-Weld Inspection(용접 후 검사), Segmentation Processing(영역 분할 처리), Feature Extraction and Recognition(특징 추출과 인식), Vision Processing Techniques(비전 처리 기법)

1. 서론

용접은 구조물의 제작에 가장 널리 이용되는 금속 접합 기술이다. 그러나 전통적으로 용접은 작업자의 기술과 숙련도에 크게 의존하는 노동 집약적인 작업이었다. 게다가 용접 기술은 작업자에 따라 크게 달라지므로 수동 용접은 반복성과 일관성이 낮은 편이다. 따라서 생산성 및 비용의 개선과

고품질의 용접을 보장하기 위해 용접의 자동화는 필수적이다. 그러나 용접의 효과적인 자동화는 로봇에 토치를 달아 단순히 교시된 경로를 따라가기 위한 수단을 제공하는 것으로 복잡하다.

특히 부재 고정의 부정확성에 대한 가능성 때문에 용접 시작하기 이전에 용접하고자 하는 재료에 정확히 위치시키고 미리 교시된 경로를 적당히 보상하기 위한 몇몇 기술이

* 인하공업전문대학 기계시스템학부 기계설계과 (jilee@inhatc.ac.kr)
주소: 402-752 인천광역시 남구 용현동 253번지
† 인하공업전문대학 기계시스템학부 기계과

요구된다. 이 과정을 부재 검출(part finding)이라 부른다. 더 나아가 부품과 부품 사이의 치수 변화, 예지 준비 허용치(edge preparation tolerance) 그리고 용접 도중의 열변형은 실시간 교정을 필요로 하게 된다. 이러한 경로의 교정은 용접 도중에 용접 토치의 전방에 실제 경로를 센싱함으로써 가능하게 된다. 이 과정을 전형적으로 용접선 추적(joint tracking)이라 부른다. 기계적, 전자기적 기술들이 제안되어 왔으나 재료의 위치 센싱은 머신 비전을 이용할 때 가장 효과적으로 수행될 수 있다. 비전 센서를 이용한 연구는 다음과 같이 진행되고 있다.

Agapakis⁽¹⁻³⁾는 비전 시스템을 이용하여 용접부의 기하학적 영상 정보 인식과 실시간 용접선 추적을 위한 용접 변수 제어 알고리즘을 제시하였고, 로봇을 이용한 용접에 적용시킬 수 있음을 보였다.

Clocksini⁽⁶⁾은 박판의 GMA 용접의 경우에 비전 시스템을 이용하여 곁침 이음(lab joint), T자 이음(T joint), 맞대기 이음(butt joint)에 효과적으로 적용됨을 보였다. Nakata^(4,5)는 광원, 카메라 위치, 분해능, 카메라의 노출 등을 통하여 실험적으로 광학 기구의 최적 기하학적 배치에 대하여 연구하였고, He-Ne 레이저, 대역 통과 필터(band pass filter), CCD카메라 등을 이용하여 GTA 용접시 용융지 전방 3mm에 개신 정보 검출 위치를 설정하고 용접선을 자동 추적하는 시스템을 구성하였다.

지금까지 대부분의 비전 센서를 이용한 용접선 추적 시스템은 단지 단층(single pass) 용접 작업에서 비교적 단순한 기하학적 형상(geometry)으로부터 홈(joint)의 위치를 찾는 데 한정되었다. 따라서, 본 연구에서는 용접 전 혹은 용접 후의 임의의 형상을 가진 홈에 대한 좀 더 향상된 기하학적 묘사와 용접선 치수 측정이 가능한 화상 처리 기법을 제시하였고 용접선 감지와 용접 토치의 추적 위치 결정을 위한 그래픽 사용자 인터페이스용 소프트웨어를 개발하여 용접선 추적에 적용하였다. 이러한 기법들을 이용하여 용접에서 중요한 용접 조인트와 용접 비드의 특징(feature)들을 정확히 추출해내도록 하였다. 이러한 정보의 신뢰성은 용접 공정 조건들의 선택 및 조정, 용접 후 검사(post-weld inspection)에의 응용, 또한 자동 용접 시스템의 개발에 있어서 절대적으로 필요로 한다. 또한 개발된 용접선 추적 시스템을 용접층의 순서와 추적위치를 지정하는 과정을 통해 단층 용접뿐만 아니라 다층(multipass) 용접에도 응용하였다.

2. 용접선 추적

2.1 비전 센서의 원리

비전 시스템은 전통적으로 부재 검출, 조인트 형상 확인(joint type identification), 용접선 추적 그리고 용접선 끝단의 검출 등에 이용된다. 두 가지의 기본적인 작동원리가 있는데 이들 모두 광학 삼각법(optical triangulation)에 기초하고 있다. 광학 삼각법은 광원과 비전 센서(vision sensor)를 기준선(base line)으로 하여 센서에 상이 맺히는 위치에 따라 삼각법에 의해 물체까지의 거리를 구하는 방식으로 처리 시간이 짧고 구조가 간단하여 널리 쓰이고 있다. 광학 삼각법을 이용하는 방식은 작동 원리와 광원에 따라 투영된 패턴(projected pattern)을 이용하는 방식 및 주사 빔(scanning beam)을 이용하는 방식으로 나눌 수 있다.

2.2 비전 처리

비전 시스템에 의한 신호 전송의 결과로서 얻어진 이미지들은 강도 이미지(intensity image)와 거리 이미지(range image)로 구분된다. 거리는 공간 좌표에 해당하는 거리 값(range value)의 배열이다. 반면에 강도 이미지는 계속되는 평면상의 공간 좌표에 해당하는 강도 값(intensity value)을 나타내는 2차원 배열이다. 본 연구에서는 비전 시스템부터 얻은 256개의 (y, z) 좌표 값으로 구성된 거리 이미지를 얻는다. 비전 시스템으로부터 얻은 원 단면 형상 데이터(raw profile data)는 용접선 추적 응용을 적용하기 위해서 몇 단계로 처리되는데, 그 최종적인 형태는 조인트 형상(joint geometry)과 실세계 공간(world space)과 토치 팁(torch tip)의 위치에 대한 상대적 위치를 표현하는데 있다. 거리 이미지뿐만 아니라 강도 이미지에서 얻어진 프로파일 데이터는 계측된 데이터와 계측된 공간상의 점들의 좌표 모두에 노이즈로서 작용하는 에러에 영향을 받는다. 예를 들어 아크 광, 스펙터, 경사면으로부터의 겹반사 등에 의해 계측된 데이터는 에러를 포함하게 된다. 따라서 대개의 경우 화상 전처리가 비전 처리의 첫 번째 단계가 된다. 이는 평균값 혹은 미디언 필터(median filter)등을 이용하여 원 단면 형상을 필터링함으로써 에러를 최소화하는 개선된 이미지를 얻을 수 있다. 그러나 이러한 필터링은 처리 시간을 증가시킨다는 단점이 있다. 비전 전처리 이후 이 정보에 기초하여 특징을 추출(feature extraction)한다. 그러나 본 연구에서는 템플릿 매칭대신에 프로파일을 직선 세그먼트(line segment)들로 변환하는 영역 분할 처리(segmentation processing)를 수행한다. 이렇게 비전 처리된 프로파일로부터 계측될 물체를 표

현하는 특징들을 확인하고 위치를 알아내는 특징 추출과 인식을 한다. 용접선의 경우 이러한 특징들은 일반적으로 특징점(feature point)과 특징선(feature surface)으로 구분될 수 있으며 조인트 에지점(joint edge point), 경사진 면(sloped surface), 루트 점(root point) 등이 이에 해당한다. 이 특징들로부터 다층 용접에 있어서의 용접 층 순서를 결정하는 적층 과정에 따라 지정되는 추적점(tracking point)을 구한다.

2.2.1 화상 전처리

화상 전처리는 이미지의 질을 개선하거나 이미지를 특정한 응용 목적에 알맞도록 변환시키는 등의 이미지 처리를 의미한다. 여기에는 평활화(smoothing), 예리화(sharpening), 고주파 차단, 저주파 차단 등의 영상 조작 등이 포함된다. 비전 시스템에 의해 데이터의 센서 보정(sensor calibration) 결과로 얻어진 원 단면 형상(raw profile)은 256개의 (y, z) 좌표값으로 표현된다. (y, z)는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 y는 용접시의 비드 폭 방향이고, z는 용접시의 용융지 깊이 방향을 의미한다. 그러나, 이러한 단면 형상은 잘못된 노이즈 포인트들을 포함할 수 있다. 단면 형상을 평활화하고 노이즈를 제거하기 위하여 필터링이 필요하다. 2차원 윈도우에서 한 값을 그 이웃한 값들의 중간 값으로 대체함으로써 프로파일상의 대부분의 다른 고주파 성분에는 크게 영향을 주지 않고 고립된 노이즈 성분을 제거하여 노이즈를 줄이는 비선형적 처리기법인 미디언 필터링이 가장 효과적이다. 필터링의 범위는 2차원 윈도우 크기를 바꾸어 줌으로써 변화시킬 수 있다. 비교적 큰 2차원 윈도우에 대해서는 날카로운 V 코너와 같은 프로파일의 몇몇 특성을 잃을 수 있으므로 이웃한 3내지 5개로 프로파일 데이터의 2차원 윈도우 크기를 잡아주는 것이 적당하다.

2.2.2 영역 분할 처리

프로파일 상에서 큰 방향의 변화는 반드시 인식되어야 할 특징에 해당된다. 이러한 프로파일의 특징들을 안정하게 인식하기 위하여 내부적으로는 비교적 큰 방향의 변화를 찾는 것과 직선 세그먼트들로 근사화하는 것에 기초하여 영역 분할 처리를 행한다. 이러한 처리는 단순히 프로파일 데이터의 (y, z) 좌표 값들의 집합으로 표현하는 것보다 간략하게 표현할 수 있으며 세그먼트들 사이의 절점(break point)만을 저장함으로써 상당한 데이터 압축 효과도 기대할 수 있다. 또한 이러한 영역 분할 처리에 기초하여 조인트 혹은 용접 비드의 일반적인 특징을 유도할 수 있다. 비교적 단순한 알고리즘으로 거리 이미지(range image)에 적합한 새롭게 영역

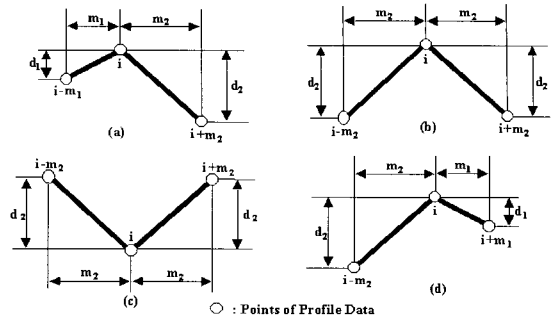


Fig. 1 Descriptions of the segmentation processing

분할 처리를 하였다. Fig. 1의 (a)~(d)는 영역 분할 처리의 기초에 사용된 알고리즘 (a)~(d)를 도식적으로 표현한 것이다.

$$|z_i - z_{i-m_1}| \leq d_1 \text{ and } |z_i - z_{i+m_2}| \geq d_2 \quad (a)$$

$$\text{or, } z_i - z_{i-m_2} \geq d_2 \text{ and } z_i - z_{i+m_2} \geq d_2 \quad (b)$$

$$\text{or, } z_i - z_{i-m_2} \leq -d_2 \text{ and } z_i - z_{i+m_2} \leq -d_2 \quad (c)$$

$$\text{or, } |z_i - z_{i-m_1}| \geq d_2 \text{ and } |z_i - z_{i+m_2}| \leq d_1 \quad (d) \quad (1)$$

여기서, \$z_i\$는 \$i\$번째 프로파일 상의 \$z\$ 좌표값을, \$m_1\$, \$m_2\$, \$d_1\$, \$d_2\$는 영역 분할 처리의 기초로 사용하기 적당한 거리를 구한 임의의 상수로서 실험을 통하여 최적의 상태가 되도록 발견적 방법(heuristic method)으로 설정하며 본 연구의 경우는 \$m_1\$을 3, \$m_2\$를 4, \$d_1\$을 3, \$d_2\$를 6으로 사용하였다.

\$m_1\$, \$m_2\$, \$d_1\$, \$d_2\$의 기하학적 의미는 가운데 절점 \$z_i\$를 가운데 두고 \$m_1\$ 또는 \$m_2\$의 거리가 떨어진 양쪽 절점간의 깊이값 크기가 \$d_1\$ 또는 \$d_2\$ 이상인가, 이하인가에 따라 영역 분할 처리의 기초가 되는 4가지 형태의 조인트 혹은 비드의 일반적 특징을 유도해 낼 수 있다는 것이다. 위 조건을 만족하는 프로파일 데이터 좌표값(\$y_i, z_i\$)를 각 직선 세그먼트들 사이의 교점인 절점(break point)으로 정하고 저장한다. 이 절점들로부터 다음 단계인 의미를 가지는 특징들을 추출한다.

2.2.3 V홈 특징 추출과 용접점 인식

영역 분할 처리에 기초하여 조인트 혹은 용접 비드의 일반적인 특징을 유도할 수 있다. V형 조인트에 대한 특징들은 Fig. 2에서 볼 수 있는 것과 같다. 이러한 특징점과 특징선에 대한 정보들을 찾는 것을 특징 추출이라 한다. 이후 이러한 정보를 이용하여 적층 과정에 따라 용접 추적점(tracking point)을 결정한다. 본 연구에서 사용된 V형 그루브에 대한

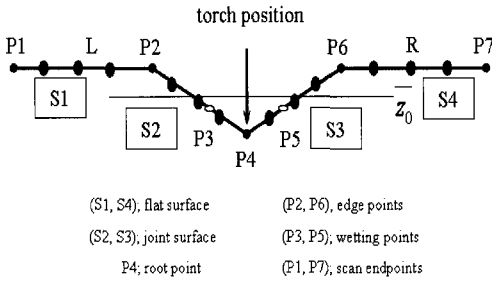


Fig. 2 Characteristic features of a Vee-grooved weld joint

특징 추출 알고리즘은 Smati와 Smith 그리고 Yapp에 의해 거리 이미지에 적합하도록 고안된 V형 그루브 검출 알고리즘 (vee-groove detection algorithm) (7)을 수정한 것이다. 이 특징 추출 알고리즘은 반복적 평균 기법(iterative averaging technique)을 기초로 한다. 프로파일 상의 모든 z축 값을 평균하여 \bar{z}_0 을 구하고 영역 분할 처리를 통해 얻어진 절점들 중에서 V형 그루브에 대한 알고리즘을 이용하여 Fig. 2에서 루트 점 P4를 중심으로 왼쪽 에지(L), P2와 오른쪽 에지(R), P6 점을 찾는다. 그 알고리즘은 다음과 같다.

(부록 참조)

첫 번째 루트 패스(root pass)인 경우에는 위에서 구한 왼쪽 에지, P2와 오른쪽 에지, P6사이의 루트점(root point), P4는 다음과 같이 찾을 수 있다.

Root:

Find k when $Z_k = \min(Z_i), i = L \dots R$

Root = k

이는 결국 두 에지점 사이에 식을 만족하는 절점이 이에 해당된다. 루트 패스이후에서는 루트점, P4는 나타나지 않으므로 용접 비드에 의해 형성되는 다층용접 추적 시점인 P3와 P5를 찾는 알고리즘이 필요하다. 영역 분할 처리를 통해 얻어진 절점 중에서 왼쪽 점점(wetting point) P3는 왼쪽 에지, P2로부터 발견되는 첫 번째 절점에서 시작하여 기울기의 변화가 가공할 때 이미 알고 있는 경사각(inclined angle)보다 커지는 절점으로 정한다. Fig. 3은 본 연구에서 적용된 알고리즘을 도식적으로 표현한 것이고 알고리즘은 다음과 같다.

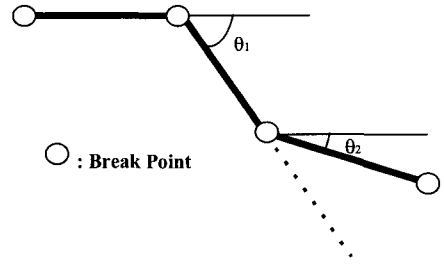


Fig. 3 Description of detecting the wetting point

Left Wet:

Find k when $\frac{Z_{k+1} - Z_k}{Y_{k+1} - Y_k} < \tan\theta, k = L \dots R$

Left wet = k

여기서, (Y_k, Z_k) 는 프로파일상의 절점의 좌표 값이다. 또한 오른쪽 점점, P5는 그 반대의 경우로 생각하여 결정할 수 있다. P3을 찾아 2차 패스를 수행하고, P5를 찾아 3차 패스를 수행한다. 이와 같은 방법으로 4차, 5차 패스의 다층 용접에도 적용 가능하다.

2.3 용접선 추적 오차 처리

용접선 추적 경로의 계산은 프로파일 형상의 이미지 해석을 어떻게 하느냐에 달려있다. 이는 추적 오차를 야기할 수 있으므로 추적 위치로 토치를 이동하기 이전에 수정해야 할 필요가 있다. 용접선이 급격히 변화하지 않는다는 가정 하에서, 이 추적 위치들을 유효화하고 기대되지 않는 급작스런 이동을 피하기 위해 그 값을 평활화 하는데 필터를 이용하였다. 필터로는 Y와 Z에 대한 최대 교정 신호(maximum correction)를 지적해 줌으로써 과거의 값들과 경향이 일치하지 않는 추적 위치로부터 계산된 조인트 위치들을 제거한다. 만일 마지막으로 받은 추적 위치값과 그전에 받은 추적 위치값들의 평균사이의 차이가 지정된 최대 교정 신호보다 크면 그 위치값은 제외하게 된다. 본 연구에서는 용접선의 대략적인 방향을 예측하면서 과거의 추적위치의 경향을 따라 용접선의 정보를 얻을 수 있도록 현재의 데이터에 가중치를 부여하는 가중 이동 평균법(weighted moving average)의 하나인 지수평활법(exponential smoothing)을 사용하였다.

$$y_a(n) = (1 - m)y_a(n-1) + my(n) \quad (2)$$

$$z_a(n) = (1 - m)z_a(n-1) + mz(n) \quad (3)$$

식 (2)~식 (3)에서, m 은 가중치로 0.25일 때 추적이 가장 잘 수행되었으며, $y_a(n-1)$, $z_a(n-1)$ 은 이전 이동 평균값, $y(n)$, $z(n)$ 은 현재 추출된 용접점의 y 및 z 방향의 좌표값 $y_a(n)$, $z_a(n)$ 은 현재 이동 평균값이다.

3. 실험

3.1 시스템 구성

실험 장치는 용접시스템부와 비전시스템부로 구성된다. 용접시스템으로는 3축 직교 로봇(three axis cartesian robot), CO₂가스 아크 용접기(최대 350A inverter welding machine), 심선 공급기, 냉각장치 및 모션 컨트롤러로 구성되어 있으며, 심선의 크기는 지름 1.2mm를 사용하였다. 비전 시스템부로는 비전 컨트롤러와 레이저 카메라로 이루어져 있으며, 비전 컨트롤러 시스템은 CPU(75MHz Pentium CPU)를 장착한 산업용 PC이고, 비전처리 및 레이저 파워 스캐닝 컨트롤(scanning control)등을 위한 DSP가 내장된 카메라 제어장치로 구성되어 있다. 비전 카메라의 분해능은 0.05mm이다. 레이저 센서의 용도로 사용된 비전 카메라는 크기가 110mm x 60mm x 48mm 이고, 깊이 측정을 위한 능동적(active) 광학 삼각법을 응용한 거리 측측 장치로써 자동 동기 주사(autosynchroni-zed scanning)방식을 사용한다. 레이저에서 발생한 광선은 실린더 렌즈를 통해 빛의 면을 형성하여 측정 물체에 투사되고, 빛의 진로와 비스듬하게 위치한 렌즈(receiver lens)가 물체 표면에서 반사되는 광선을 수광부(photo-sensitive detector)에 비치게 한다. 수광부는 2D의 CCD로 구성되어 있어서 물체의 단면이 CCD상에 형성된다. 측정된 프로파일(profile)은 소프트웨어가 분리하여 단면상의 각점의 위치를 계산한다. 광원으로는 출력 40mW, 가시 레이저 다이오드, 파장 680nm의 레이저 다이오드를 사용하며, 또한 카메라의 렌즈부에는 아크 용접시에 발생하

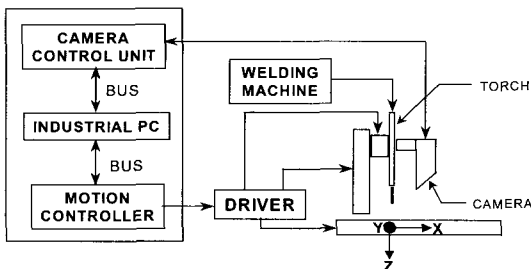


Fig. 4 System configuration for joint tracking

는 아크 광, 스파터, 가스 등에 의한 노이즈를 줄이기 위한 대역 통과 필터를 설치하고 있다. 레이저 카메라는 256개점을 샘플링을 하며, 초당 40 프로파일링(profiling)을 행하며, 카메라 보정 계수(camera scaling factor)는 0.02이다. 여기에는 사용자 포트(User port)와 로봇 포트(Robot port)가 있으며, 사용자 포트로는 ISA bus를 통해 카메라 제어 장치와 PC간의 데이터 송수신이 이루어지고, 로봇 포트로는 로봇 컨트롤러와 PC간의 용접선 오차 보정량의 송수신을 RS232C 직렬통신으로 수행한다.

Fig. 4는 레이저 카메라와 시스템에 대한 개략도이다.

3.2 추적 모드의 용접선 추적 흐름도

용접선 추적을 위한 전체 흐름도는 먼저 데이터를 획득 후, 잡음(noise) 제거와 영역 분할과정, V홈에서 특징을 추출하고 특징점을 인식하는 과정을 거친다. 특징점 인식이란 반복적 평균 기법을 통해 예지 점, 루트 점을 인식하고 다층 용접을 위한 접점을 찾는 비전 처리과정을 의미한다. 이를 용접 토치가 움직여야 할 좌표값으로 변환시키고 추적점을 이동 평균법에 의해서 다음 추적점에 대한 보정량을 시스템에 주게 된다. 이상과 같은 반복 작업으로 실시간 용접선 추적을 수행하게 된다. 이에 대한 흐름도는 Fig. 5에 나타내었다.

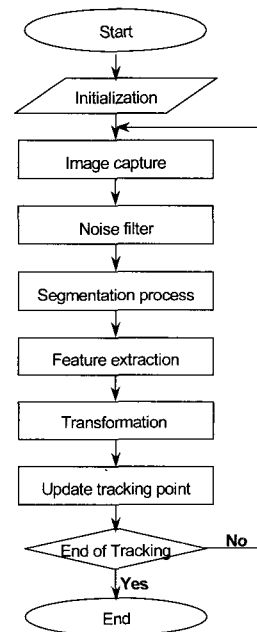


Fig. 5 Flow chart of joint tracking in tracking mode

3.3 실험방법

용접시편은 가로 70mm, 세로 200mm, 두께 16mm의 연강을 가접 후, 맞대기 용접을 수행하였으며, 용접시의 변형 및 비전시스템의 추적을 원활히 하기 위해 맞대기 용접에 적합한 지그를 사용하였다. 다층 용접을 위해 세로의 길이 방향으로 각 시편에 30°씩 즉, 맞대기 용접시 V홈이 전체 16mm중 13mm가 60°각도를 이루고, 3mm의 루우트 면(root face)으로 그루브 각을 만들어 실험하였다.

심선은 직경 1.2mm의 솔리드 와이어를, 보호가스로는 100% CO₂ 가스를 유량 15 ℓ/min로 사용하였다. 용접조건은 루트패스, 2차 패스 및 3차 패스에서 용접전류 180A, 용접전압 26V, 용접속도 5mm/sec로 수행하였다. 양질의 비드를 얻기 위한 이상의 용접조건들은 수차례 실험으로 정할 수 있었다. 레이저 카메라는 용접토치의 전방에 설치하여 일정거리(LAD: look ahead distance, 26mm) 앞의 용접선의 위치를 검출하도록 하였다. 실험은 다음 순서와 같이 수행하였다.

비전치리로 추출되는 용접선의 추적 오차 처리를 위해 가중 이동 평균법의 지수 평활법을 사용하여 실험을 수행하여 최적의 가중치를 구하는 실험을 수행하였으며, 가중치는 0.25일 때 추적이 가장 잘 수행되었다. 3축 로봇을 이용하여 다층 용접에서 설정된 용접선 위치를 기준에 대하여 여러 각도로 바꾸어 몇 도의 이탈각도(deviation)까지 추적할 수 있는지 추적 실험하여 보았다. 또한, 용접선 추적을 용이하게 하기 위해 한글 GUI(Graphic User Interface) 프로그램을 개발하여 용접선 추적에 필요한 각 파라미터의 수정이 용이하도록 하여, 실제 용접에서 용접선 추적이 이루어지는 동안에 실시간으로 각 파라미터와 프로파일 등을 모니터링할 수 있도록 하였다.

3.4 실험결과

다층 용접시의 용접선과 토치의 중심은 점점으로 두고 실험한 결과 용접선의 추적각을 루트 패스는 5°에서 10°사이, 2차 패스는 6°에서 12°사이, 3차 패스는 7°에서 14°사이에서 수행하였다. 각각의 실험에 대한 추적 결과 및 결과 시편은 다음과 같다. 추적 결과도에서 일직선선은 용접선(weld line)을 실선은 추적선(tracking line)을 표시한 것이다.

3.4.1 루트패스의 추적실험

Fig. 6은 조인트 추적 프로그램에서 루트 패스의 실시간 추적 예를 보여주는 것이다. Fig. 7의 (a), (b), (c)는 V홈 루트 패스의 5°, 7°, 10°때의 추적으로, 용접선과 추적선의 추

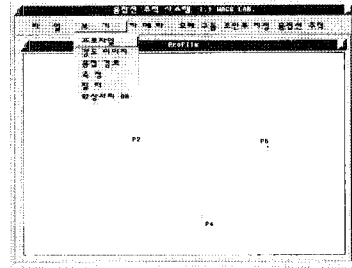
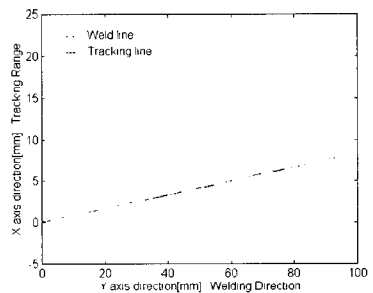
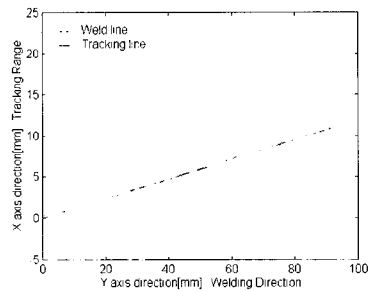


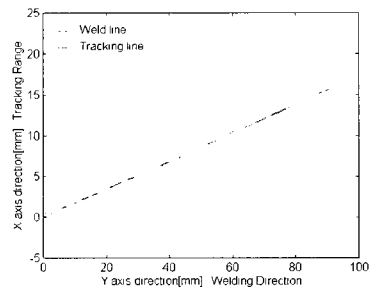
Fig. 6 Example for the root pass on joint tracking program



(a) 5 degree



(b) 7 degree



(c) 10 degree

Fig. 7 Tracking results of V groove on 5, 7, 10 degree of the root pass

Table 1 Tracking results of V groove on 5, 7, 10 degree of the root pass(Unit: mm)

추적각 추적각	평균오차	최대오차	표준편차
5 degree	0.11	0.24	0.18
7 degree	0.13	0.44	0.27
10 degree	0.16	0.68	0.32



Photo 1 Cross section of the root pass in butt welding

적 결과를 보여준다. 루트 패스의 평균오차, 최대오차, 표준편차의 결과는 아래 Table 1에 나타내었다. Photo 1은 Fig. 6의 용접부 실제 단면부를 부식한 외관이다.

3.4.2 2차 패스의 추적실험

Fig. 8은 조인트 추적 프로그램에서 2차 패스의 실시간 추적 예를 보여준다.

Fig. 9의 (a), (b), (c)는 V홈 2차 패스의 6°, 9.5°, 12°대의 추적으로, 용접선과 추적선의 추적 결과를 보여준다. 2차 패스의 평균오차, 최대오차, 표준편차의 결과는 아래 Table 2

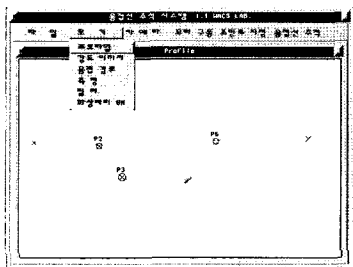
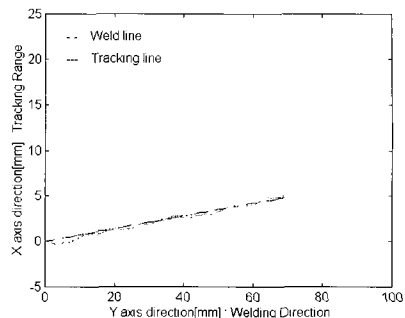
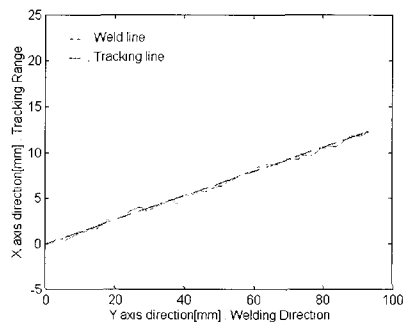


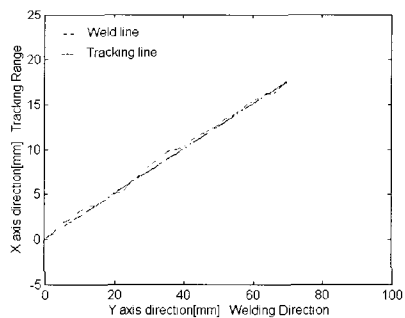
Fig. 8 Example for the second pass on joint tracking program



(a) 6 degree



(b) 9.5 degree



(c) 12 degree

Fig. 9 Tracking results of V groove on 6, 9.5, 12 degree of the second pass

Table 2 Tracking results of V groove on 6, 9.5, 12degree of the second pass(Unit: mm)

추적각 추적각	평균오차	최대오차	표준편차
6 degree	0.14	0.31	0.24
9.5 degree	0.21	0.56	0.35
12 degree	0.23	0.76	0.39

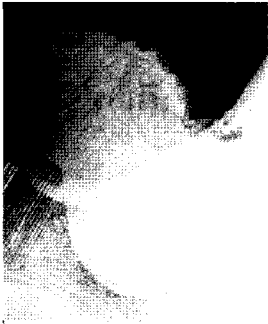


Photo 2 Cross section of the second pass in butt welding

에 나타내었다. Photo 2는 Fig. 8의 용접부 실제 단면부를 부식한 외관을 보여준다.

3.4.3 3차 패스의 추적실험

Fig. 10은 조인트 추적 프로그램에서 3차 패스의 실시간 추적 예를 보여준다. Fig. 11의 (a), (b), (c)는 V홈 3차 패스의 7°, 10°, 14°때의 추적 결과로, 용접선과 추적선의 추적 결과를 보여준다. 3차 패스의 평균오차, 최대오차, 표준편차의 결과는 아래 Table 3에 나타내었다. Photo 3은 Fig. 10의 용접부 실제 단면으로 단면부식 외관을 보여준다.

이상과 같은 다층용접의 추적 성능 실험에서 동일한 각도에서 성능을 평가하였을 때, 생기는 평균오차, 최대오차 및 표준편차는 조금씩 다른 값을 보여주고 있으나, 추적오차는 심선 크기 1.2mm와 비교하여, 만족스러운 추적성능을 보여주고 있다. 본 실험에 사용된 시각센서는 토치와 레이저 카메라 사이에 일정거리를 두고 있다. 본 연구에서 평균오차는 추적선과 기준선(reference line)의 절대값의 오차를 평균한 값이며, 표준편차는 용접선 추적의 전체적인 경향을 나타낸다. 추적오차의 경향을 보면 본 연구에서 추적은 절점을 따

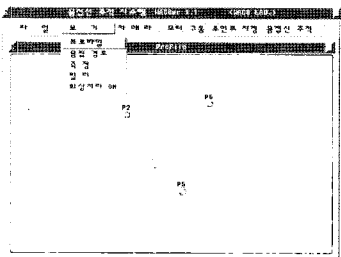
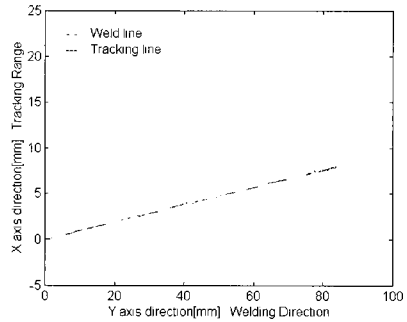
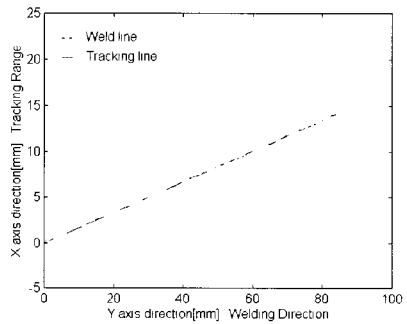


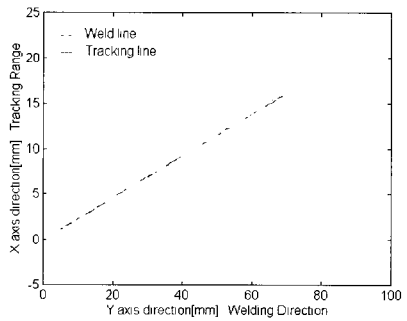
Fig. 10 Example for the third pass on joint tracking program



(a) 7 degree



(b) 10 degree



(c) 14 degree

Fig. 11 Tracking results of V groove on 7, 10, 14 degree of the third pass

Table 3 Tracking results of V groove on 7, 10, 14 degree of the third pass(Unit: mm)

추적각	추적오차	평균오차	최대오차	표준편차
7 degree		0.16	0.32	0.26
10 degree		0.22	0.59	0.36
14 degree		0.24	0.77	0.38

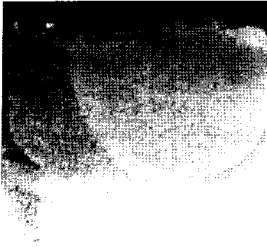


Photo 3 Cross section of the third pass in butt welding

라 수행되므로 레이저 비전에 의해서 추적선을 비교적 찾기가 용이한 루트 패스의 추적오차는 2, 3차 패스 추적에 비해 평균오차 및 최대오차가 작음을 알 수 있었고, 루트부의 개선을 그대로 평행 이동한 2, 3차 패스 추적에서는 루트 패스위의 비드 끝단을 쫓아가는 것으로 루트 패스에 비해 평균오차 및 최대오차에서 다소 큰 추적오차를 보여준다. 같은 패스의 용접에서도 추적각이 크면 추적성능이 떨어져 오차가 커짐을 알 수 있었다. 그 이유는 센서가 고정된 경우에 같은 지수평활법 식에 같은 가중치 m 을 사용하는 경우는 추적성능은 일정하므로 추적각을 크게 하면 할수록, 패스 수가 증대되면 될수록 추적오차는 중첩되어 점점 커지는 것은 당연할 것이라고 생각된다. 그러나 V 그루브 용접에서는 가장 깊은 부분의 루트용접 및 용융열에 의해 형성되는 불규칙한 비드형상에서도 절점을 잘 찾기 위한 추적 알고리즘이 필요하다. 본 실험에서는 실시간 추적 용접으로 아크 열, 스파터와 같은 강한 외란에도 견딜 수 있는 강한인 알고리즘이 필요하다. 본 연구의 실험에 2.2.2에 나타난 개발 알고리즘과 2.2.3에 나타난 기존 알고리즘을 비교한 결과 2.2.2의 개발 알고리즘이 절점을 찾는 데 뛰어난 성능을 보여주었고 이는 추적성능과 직결된 결과를 보여주었다. 지수평활법에 사용된 y, z 식의 가중치 m 은 여러 번의 실험을 통해 얻을 수 있었으며 여기서 구해진 0.25도 1/10인 0.2에서 더 깊이 들어가 최적의 추적성능을 얻기 위해 1/100까지 구간별로 0.01씩 증분 또는 감소시키며 구한 값이다. 0.25를 기준으로 0.01씩 증분되면 추적오차는 표준편차가 증대되었으며, 0.01씩 감소되면 추적오차는 표준편차가 감소됨을 보여주었다. 그러나, 3차까지의 패스까지의 최대 오차가 0.8mm를 넘지 않음을 보여 줌으로서 심선지름을 고려해 볼 때, 심선 지름에 비해 훨씬 큰 추적오차를 보여준 아크 센서⁽²⁾ 등에 비해 본 연구의 추적성능이 양호함을 알 수 있었다.

4. 결론

다층 용접의 용접 자동화를 위한 연구로서 비전 시스템을 이용한 V홈 맞대기의 용접선 추적 제어에 대한 실험 및 고찰을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 비전센서를 이용하여 얻어지는 거리 이미지를 다층 용접의 실시간 용접선 추적에 적용하여 다층 용접의 실시간 용접 자동화 기법을 구축하였다.
- (2) 3축 직교 로봇에 의한 임의의 각도의 용접선 추적은 3차 패스 용접에 이르기까지 최대오차가 심선의 직경 1.2mm 이하 값을 보여주었으며, 이는 결과적으로 추적성능이 우수함을 보여 준다.
- (3) 각 파라미터와 프로파일 등을 실시간 모니터링 할 수 있도록 한글 그래픽 사용자 인터페이스용 소프트웨어를 개발하여 용접선 추적에 적용하였다.
- (4) 다양한 V홈 각도 및 3차 이상의 다층용접을 수행할 수 있는 용접 자동화 기법 기초를 마련했다.

참고 문헌

- (1) Agapakis, J. E., 1990, "The 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.
- (2) Agapakis, J. E., 1986, "Joint Tracking and Adaptive Robotic Welding using Vision Sensing of the Weld Joint Geometry," *Welding Journal*, Vol. 65, No. 11, pp. 33~41.
- (3) Agapakis, J. E., 1990, "Vision-Aided Robotic Welding: An Approach and a Flexible Implementation," *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 9, No. 5, pp. 17~34.
- (4) Nakata, S. and Jie, H., 1989, "Construction of Visual Sensing System for In-process Control of Arc Welding Process and Application in Automatic Weld line Tracking," *Transactions of Japanese Welding Society*, Vol. 7, No. 4, pp. 467~472.
- (5) Nakata, S., 1989, "Determination on Geometrical Arrangement of Optical Equipments and Photographic Parameters for Construction of Visual Sensing System," *Transactions of Japanese Welding Society*, Vol. 7,

No. 3, pp. 358~362.

- (6) Clocksin, W. F., 1985, "An Implementation of Model-Based Visual Feedback for Robotic Welding of Thin Sheet Steel," *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 4, No. 1, pp. 13~26.
- (7) Nayak, N. and Ray, A., 1993, Intelligent Seam Tracking for Robotic Welding, Springer-Verlag.
- (8) Kim, I.-S. and Jun, K.-S., 2002, "Optimal Process Parameters for Achieving the Desired Top-Bead Width in GMA Welding Process," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 11, No. 4, pp. 89~96.
- (9) Kim, I.-S., Jeong, Y.-J., Lee, C.-W. and Park, J.-S., 2002, "Development of an Automatic Pump Design System using Auto CAD," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 11, No. 1, pp. 91~96.

[Appendix]

First Average,

$$\bar{z}_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i$$

Find L when $Z_L > \bar{z}_0$, $Z_{L+1} < \bar{z}_0$, $1 \leq L \leq N$

(L: Left side of Fig. 2 profile)

Find R when $Z_R > \bar{z}_0$, $Z_{R-1} < \bar{z}_0$, $1 \leq R \leq N$

(R: Right side of Fig. 2 profile)

Left Edge:

$$\bar{Z} = \bar{z}_0$$

Repeat

1. If $(Z_k < (\bar{Z} - tolerance))$, $k = L \dots 1$

Then L = k

$$2. \bar{Z} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L Z_i$$

Until $Z_k \geq (\bar{Z} - tolerance)$, $\forall k \in [1, L]$

Left Edge = L

Right Edge:

$$\bar{Z} = \bar{z}_0$$

Repeat

1. If $(Z_k < (\bar{Z} - tolerance))$, $k = R \dots N$

Then R = k

$$2. \bar{Z}_0 = \frac{1}{N-R+1} \sum_{i=R}^N Z_i$$

Until $Z_k \geq (\bar{Z} - tolerance)$, $\forall k \in [R, N]$

Right Edge = R

여기서 n; 전체 프로파일에 나타난 데이터의 개수, N; 프로파일 상의 절점의 개수, z_i ; 프로파일 상의 z 좌표값, Z_i ; 프로파일 상의 절점의 z 좌표값이고 허용폭(tolerance band)은 조인트의 크기와 레이저 카메라의 분해능에 따라 달라짐.