

## 용접 이음 추적시스템의 응용

이정익\*, 고병갑†

(논문접수일 2006. 8. 30, 심사완료일 2006. 11. 15)

### The Application of the Welding Joint Tracking System

Jeong-ick Lee\*, Byung-kab 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 systems, 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. In this paper, novel presented, developed vision processing techniques are detailed, and their application in welding fabrication is covered. The software for joint tracking system is finally proposed.

**Key Words** : vision sensor(비전 센서), autosynchronized scanner(동기화 주사방식), joint tracking system(이음 추적 시스템)

### 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

것 이상으로 복잡하다. 특히 부재 교정의 부정확성에 대한 가능성 때문에 용접 시작하기 이전에 용접하고자 하는 재료에 정확히 위치시키고 미리 교시된 경로를 적당히 보상하기 위한 몇몇 기술이 요구된다. 이 과정을 부재검출(part finding)이라 부른다. 더 나아가 부품과 부품 사이의 치수 변화, 예지 준비 허용치(edge preparation tolerance) 그리고 용접도중의 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 기

\* 인하공업전문대학 기계시스템학부 기계설계과 (jilee@inhac.ac.kr)

주소: 402-752 인천광역시 남구 용현동 253번지

† 인하공업전문대학 기계시스템학부 기계과

술들이 제안되어 왔으나 재료의 위치 센싱은 머신 비전을 이용할 때 가장 효과적으로 수행될 수 있다. 비전 센서를 이용한 연구는 다음과 같이 진행되고 있다.

Agapakis<sup>(1-3)</sup>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.

Clocksın<sup>(4)</sup>은 박판의 GMA 용접의 경우에 비전 시스템을 이용하여 겹침 이음(lab joint), T자 이음(T joint), 맞대기 이음(butt joint)에 효과적으로 적용됨을 보였다.

Nakata<sup>(5,6)</sup>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 개선 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 비전 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 차후 연구 과제인 용접 공정 조건(welding process condition)들의 선택 및 조정, 용접 후 검사(post-weld inspection)에 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(multi-pass) 용접에도 응용하였다.

## 2. 비전 센싱의 원리(Vision Sensing Principle)

비전 시스템은 전통적으로 부재 검출(part finding), 조인트 타입 확인(joint type identification), 용접선 추적(joint tracking) 그리고 용접선 끝단(end of seam)의 검출 등에 이용된다. 비전 시스템은 그 작동 원리와 광원에 따라 투영된 패턴(projected pattern)을 이용하는 방식과 주사 빔

(scanning beam)을 이용하는 방식으로 나눌 수 있는데 이들은 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.

### 2.1 투영된 패턴(projected pattern)을 이용하는 비전센서

투영된 패턴을 이용하는 방식은 원통형 렌즈(cylindrical lens)를 사용하여 모재 표면에 평면 광(plane light)을 투사한다. Fig. 1에서 투영된 패턴을 이용한 비전 시스템을 개략적으로 나타내었다. 경우에 따라서는 원뿔 형태의 빔을 이용하기도 하는데 스패터(spatter)와 같은 노이즈를 줄이는 효과와 센서의 장착으로 인한 로봇의 자세 제약에 효과가 있는 것으로 알려져 있다. 레이저 광이 조사된 이후 물체에 의해 반사된 광은 광 평면에 대해 상대적 거리와 각을 가진 2차원 CCD 배열에 의해 검출 혹은 관측된다. 이는 물체의 높이 차이를 카메라 이미지를 처리함으로써 측정할 수 있음을 의미한다. 서로 다른 면사이의 상대적 거리는 광학 삼각법을 이용하여 계산된다. 이렇게 얻어진 이미지는 주로 강도 이미지(intensity image)가 되며 거리 이미지(range image)에 비해 비전 처리 과정에서 stripe 추출과 세선화(thinning) 과정이 더 추가된다. 구체적인 이미지 처리의 알고리즘은 적용하는 용접 조인트의 형상에 따라라도 달라지지만 일반적으로 다음과 같이 구성된다.

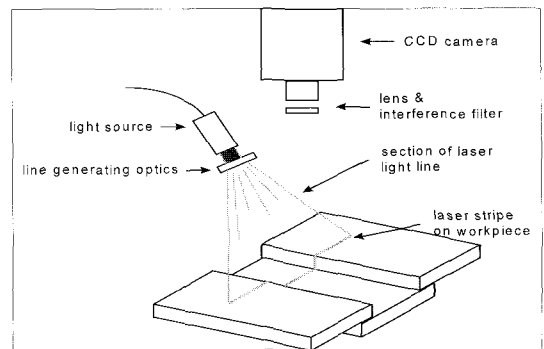


Fig. 1 Schematic Diagram of the Projected Pattern Light

## 2.2 특징 추출(Feature Extraction)

레이저 stripe 추출 및 세션화에서 얻은 정보로부터 그루브의 양단, 단차 등에 해당하는 특징점과 특징선을 추출해내는 방법이다. 조인트의 형상에 따라 여러 발견적 방법(heuristic method)이 개발되었는데 맞대기 조인트인 경우 레이저 중심선의 농도값을 이차 차분하는 방법, 겹치기 조인트인 경우 중심선의 좌표값을 미분하는 방법 등이 있다. 일반적인 조인트 형상을 인식하기 위한 방법으로는 미리 조인트 형상을 모델링하여 중심선 좌표와 관련시키는 방법, 적합한 (fitting) 중심선 세그먼트(segment)의 기하학적 매개 변수와 모델의 기하학적 매개변수를 비교하는 방법 등이 있다. 프로파일 상에서 큰 방향의 변화는 반드시 인식되어야 할 특징(feature)들에 해당된다. 이러한 변화의 검출에 2차 중앙 차분 연산자(second central difference operator)가 적용되는 예를 살펴보면 강도 이미지( $u, v$ ) 좌표는  $v(u)$ 의 형태로 표현되며 이 연산자는 다음 식 (3)과 같다.

$$S(u) = [v(u+k) + v(u-k) - 2v(u)]/2k \quad (3)$$

이 연산자의 출력값은 직선인 경우 0이 되고 두 직선 세그먼트사이의 급격한 기울기를 가지는 점을 평가할 때는 그 기울기 차이에 비례한다. 이 출력값의 극값들이 곧 특징점(feature point)이거나 특징점의 가능성을 가진다.

## 2.3 System Configuration

본 연구에서는 캐나다 Servo Robot사의 CAMI System을 사용하였다. 이 시스템에는 AMD 5x86 CPU(75MHz Pentium CPU에 해당)를 장착한 산업용 PC(industrial PC)와 비전 처리 및 레이저 파워와 스캐닝 컨트롤(scanning control) 등을 위한 DSP가 내장된 카메라 제어 장치(camera control unit)로 구성되어 있다.

레이저 카메라(laser camera)는 Servo Robot사의 M-SPOT-90을 사용하였다. 이 카메라는 자동 동기 주사(autosynchronized scanning)와 결합된 광학 삼각법을 응용한 광학 프로파일링 레이저(optical profiling laser)와 1차원 CCD 배열(array)을 이용하여 용접 접합부의 단면 형상(profile)을 포착한다. 광원으로는 파장이 680nm의 적색 가시광선인 출력 40mW의 레이저 다이오드(laser diode)가 사용되었으며 또한 아크 용접시 발생하는 아크 광, 스펙터, 연기 및 가스 등에 의한 노이즈를 줄이기 위해서 특정 파장 대역만을 통과시키는 대역 통과 필터(band pass filter)가 카메라의 렌즈 부분에 설치되어 있다. 필터의 중심 파장은 680nm이며 반치폭은  $\pm 1\text{nm}$ 인 것이 사용되고 있다. 이 카메라는 1주사선에 256

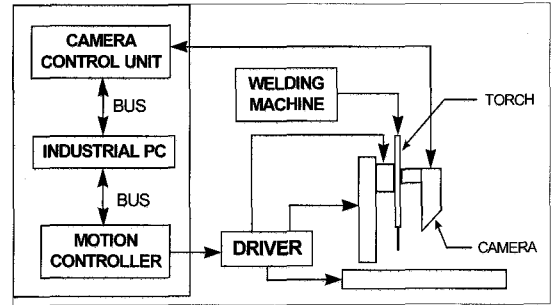


Fig. 2 System Configuration for Joint Tracking

개의 점을 샘플링하고 1초에 40 프레임(frame)의 단면 형상을 처리할 수 있다. 모션 컨트롤러는 Parker Hannifin사의 모터 제어용 보드(AT6400-AUX)를 사용하였다. 또한 3축 직교 로봇을 제어하기 위해 스테핑 모터(x축; OEM83-62-MOS, y, z축; OEM57-83-MOS)와 구동 장치(OEM series)를 사용하였다. CO<sub>2</sub> 용접기(ARTISAN-350P)가 용접시 사용되었다.

## 2.4 비전 전처리(Vision Preprocessing)

비전 전처리(vision preprocessing)는 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)상의 256개의 (y, z) 좌표값으로 표현된다. 그러나 이러한 단면 형상은 잘못 인식된 노이즈 포인트들을 포함할 수 있다. 단면 형상을 평활화하고 노이즈를 제거하기 위하여 필터링이 필요하다. 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 윈도우 크기를 바꾸어 줌으로써 변화시킬 수 있다. 비교적 큰 윈도우에 대해서는 날카로운 V 코너와 같은 프로파일의 몇몇 특성을 잃을 수 있으므로 이웃한 3내지 5개로 프로파일 데이터의 윈도우 크기를 잡아주는 것이 적당하다.

## 2.5 영역 분할 처리(Segmentation Processing)

프로파일 상에서 큰 방향의 변화는 반드시 인식되어야 할 특징(feature)들에 해당된다. 이러한 프로파일의 특징들을

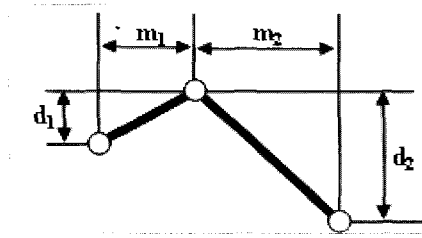


Fig. 3 Description of the Segmentation Processing

안정적으로 인식하기 위하여 내부적으로는 비교적 큰 방향의 변화를 찾는 것과 직선 세그먼트들로 근사화 하는 것에 기초하여 영역 분할 처리(segmentation processing)를 한다. 이러한 처리는 단순히 프로파일 데이터의 (y, z) 좌표 값들의 집합으로 표현하는 것보다 간략하게 표현할 수 있으며 세그먼트들 사이의 절점(breakpoint)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 분할 처리를 하였다. Fig. 3은 본 연구에서 적용된 알고리즘을 도식적으로 표현한 것으로 그림에 나타난 것의 상하·좌우 대칭에 대해서도 영역 분할 처리를 한다. 영역 분할에 사용된 알고리즘은 다음 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned}
 &|z_k - z_{k-m_1}| \leq d_1 \text{ and } |z_k - z_{k+m_2}| \geq d_2 \\
 \text{or, } &z_k - z_{k-m_2} \geq d_2 \text{ and } z_k - z_{k+m_2} \geq d_2 \\
 \text{or, } &z_k - z_{k-m_1} \leq -d_2 \text{ and } z_k - z_{k+m_2} \leq -d_2 \\
 \text{or, } &|z_k - z_{k-m_1}| \leq d_1 \text{ and } |z_k - z_{k+m_2}| \geq d_2
 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,  $m_1, m_2, d_1, d_2$ 는 임의의 상수로서 실험을 통하여 최적의 상태가 되도록 발견적 방법으로 설정하였다. 위 조건을 만족하는 프로파일 데이터 좌표값 ( $y_k, z_k$ )를 각 직선 세그먼트들 사이의 교점인 절점(break point)으로 정하고 저장한다. 영역 분할 처리이후 이 절점들로부터 다음 단계인 의미를 가지는 특징들을 추출한다.

## 2.6 특징 추출과 인식(Feature Extraction and Recognition)

영역 분할 처리에 기초하여 조인트 혹은 용접 비드의 일반적인 특징을 유도할 수 있다. 전형적인 V형 조인트에 대한 특징들은 Fig. 4에서 볼 수 있는 것과 같다. 이러한 특징 점과 특징선에 대한 정보들을 찾는 것을 특징 추출이라 한

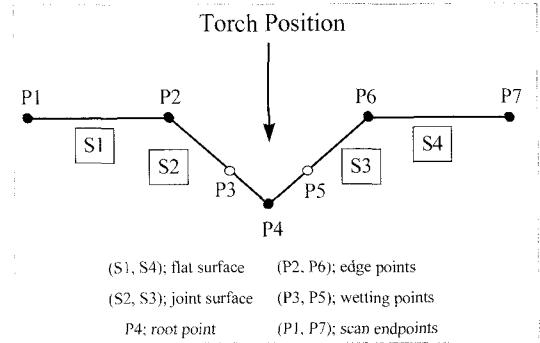


Fig. 4 Characteristic Features of a Grooved Weld Joint

다. 이후 이러한 정보를 이용하여 레이어링 과정(layering process)에 따라 추적점(tracking point)을 결정한다. 본 연구에서 사용된 V형 그루브에 대한 특징 추출 알고리즘은 Smati와 Smith 그리고 Yapp에 의해 거리 이미지에 적합하도록 고안된 V형 그루브 검출 알고리즘(vee-groove detection algorithm)<sup>(7)</sup>을 수정한 것이다. 이 특징 추출 알고리즘은 반복적 평균 기법(iterative averaging technique)에 기초한다. 프로파일의 모든 z축 값을 평균하여  $\bar{z}_0$ 을 구하고 영역 분할 처리를 통해 얻어진 절점(break point)들 중에서 V형 그루브에 대한 알고리즘을 이용하여 Fig. 7에서 왼쪽 에지, P2와 오른쪽 에지, P6 점을 찾는다. 결국 전체 프로파일 데이터의 평균값보다 커지는 절점으로부터 시작하여 flat surface, S1과 S4를 중심으로 형성되는 허용 폭내에 들어가게 되는 첫 번째 절점을 찾게 된다. 첫 번째 루트 패스(root pass)인 경우에는 위에서 구한 왼쪽 에지, P2와 오른쪽 에지, P6사이의 루트 점(root point), P4는 다음과 같이 찾을 수 있다.

Root:  
 Find k when  $Z_{k+1} > Z_k, k = L \dots R$  (5)  
 Root = k

이는 결국 두 에지점사이의 극점에 해당된다. 개발된 프로그램 상에서 V형 그루브에 대한 루트 패스의 예를 Fig. 5에 나타내었다.

루트 패스이후에서는 루트점, P4는 나타나지 않으므로 용접 비드에 의해 형성되는 wetting point, P3와 P5를 찾는 알고리즘이 필요하다. 영역 분할 처리를 통해 얻어진 절점 중에서 왼쪽 wetting point, P3는 왼쪽 에지, P2로부터 발견되는 첫 번째 절점에서 시작하여 기울기의 변화가 가공할 때 이미 알고 있는 경사각(inclined angle)보다 커지는 절점

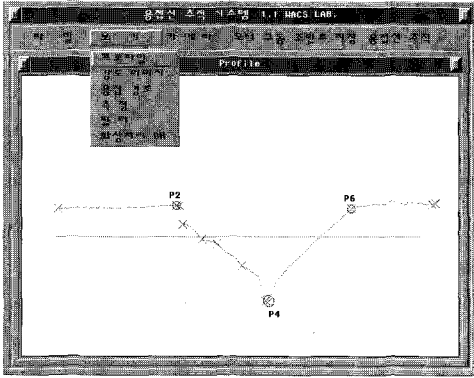


Fig. 5 Example for the Root Pass on Joint Tracking Program

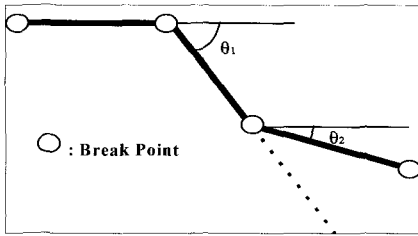


Fig. 6 Detection of the Wetting Point

으로 정한다. Fig. 6은 본 연구에서 적용된 알고리즘을 도식적으로 표현한 것이고 알고리즘은 다음과 같다.

Left Wet:

$$\text{Find } k \text{ when } \tan\theta_2 = \frac{Z_{k+1} - Z_k}{Y_{k+1} - Y_k} < \tan\theta_1, \quad (6)$$

where,  $k = L \dots R$

여기서,  $(Y_k, Z_k)$ 는 프로파일상의 절점의 좌표값이다. 또한, 오른쪽 wetting point, P5는 그 반대의 경우로 생각하여 결정할 수 있다. 개발된 프로그램 상에서 V형 그루브에 대한 두 번째 패스에서 왼쪽 wetting point를 추적 위치로 처리한 예를 Fig. 7에 나타내었다.

### 3. Development of software for Joint Tracking using GUI

본 연구에서는 운영자가 프로그램의 내부를 모르더라도 사용하는 데 지장이 없도록 여러 가지 기능을 추가하여 본 프로그램만으로 용접선 추적이 가능하도록 하였다.

개발된 프로그램은 compiler로서 Borland C++를 사용하였다. 그리고 한글 라이브러리를 이용하여 프로그램을 한글화하였기 때문에 모국어가 아닌 영어를 이해하는데 드는 노력을 최소화하였다. 또한, GUI(Graphic User Interface)를 이용한 메뉴 방식과 마우스로 모든 작업이 가능하도록 하였고, 용접선 추적에 필요한 각 파라미터의 수정이 용이하도록 하였다. 실제 용접에서 용접선 추적이 이루어지는 동안에 on-line으로 각 파라미터와 프로파일 등을 모니터링할 수 있도록 배려하였다. Fig. 8은 프로그램의 추적 모드상에서 세 번째 패스의 예를 보여주고 있다. 비전 처리를 통하여 조인트 혹은 용접 비드의 특징들을 추출하고, 이러한 특징들에 대한 정보를 이용하여 프로그램 상에서 레이어링 과정(layering process)의 각 파라미터를 지정해 줌으로써 추적

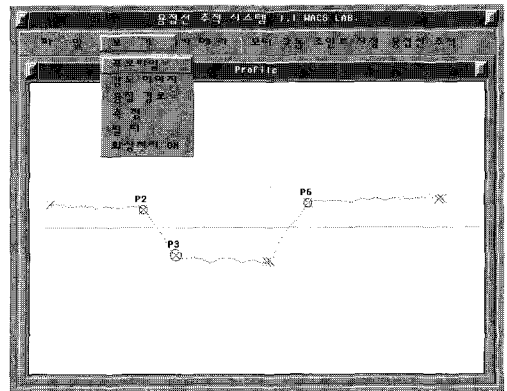


Fig. 7 Example for the Second Pass on Joint Tracking Program

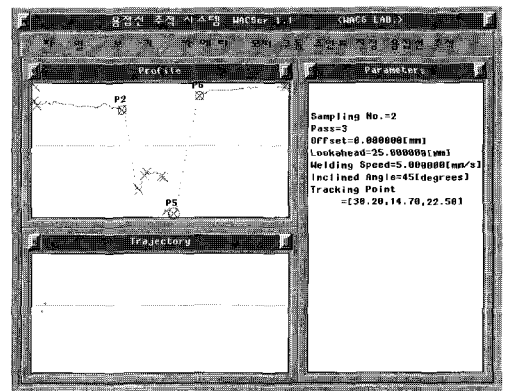


Fig. 8 Tracking mode for the Third Pass on Joint Tracking Program

점(tracking point)을 결정하도록 하였다.

### 3.1 추적 모드의 용접선 추적 흐름도

용접선 추적을 위한 전체 흐름도(flow chart)를 Fig. 9에 나타내었다.

### 3.2 Multipass Layering Process

지금까지의 비전 센서를 이용한 용접선 추적 시스템들은 주로 단층 용접(single pass)에 국한된 것들이었다. 본 연구에서는 루트 패스뿐만 아니라 이후의 두 번째 패스, 세 번째 패스에서 적용할 수 있는 알고리즘을 제시하였다.

일반적인 경우 첫 번째 루트 패스(root pass)인 경우에는 위에서 구한 왼쪽 예지, P2와 오른쪽 예지, P6사이의 루트 점(root point), P4가 추적 위치(tracking position)가 된다. 그러나 멀티패스 용접이 필요한 후판의 V형 그루브 용접시에 용접선 추적 시스템을 적용시키기 위해서는 루트 패스 시와 다른 몇 가지 루틴(routine)이 필요하다. 우선 다층 용접에서 두 번째 패스일 경우 추적 위치를 wetting point에

해당하는 P3 점으로 가정하면 P3을 찾기 위한 루틴과 Fig. 10에 나타난 것과 같은 다층 용접 순서(multipass procedure)가 필요하다.

Fig. 10과 Fig. 11에 나타난 것과 같이 추적 위치는 용접 비드의 특징 추출과 인식 과정을 통해 얻어진 특징점 들로부터 다층 용접 순서와 편차(offset), m에 따라 기준점을 조정해 줌으로써 계산된다. 그 한 예로서 편차, m이 0인 경우 추적 위치는 첫 번째 패스에 대해서는 그루브의 root point; 2, 4 번째 패스에 대해서는 왼쪽 wetting point; 3, 5 번째 패스에 대해서는 오른쪽 wetting point가 된다. 이와 같이 다층 용접 순서와 편차를 함께 지정함으로써 용접은 진행된다. Fig. 12에 V형 그루브에 대한 3 번째 패스일 때의 추적 위치로 wetting point를 찾은 예를 보여 주고 있으며 여기서 편차는 0이다.

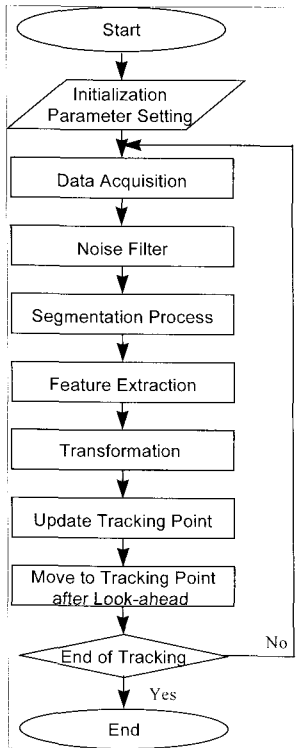


Fig. 9 Flow Chart of Joint Tracking in Tracking Mode

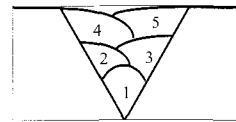


Fig. 10 Multipass Procedure

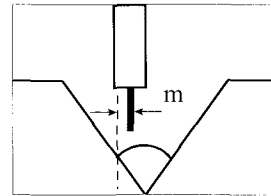


Fig. 11 Setting of Tracking Position

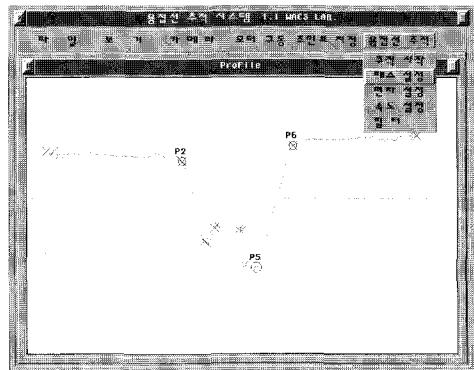


Fig. 12 Example for the Third Pass on Joint Tracking Program

### 4. 축 직교 로봇을 이용한 용접선 추적

조인트에 기초한 용접 토치에 대한 추적 위치(tracking position) (y, z)은 카메라 좌표계(camera coordinate frame) 상에서 계산된다. 그리고 모재에 대한 토치의 방향이 결정될 수 있으므로 완전한 3차원의 용접선 추적이 가능하다. 그 이후, 모션 컨트롤러로 보내진 과거의 교정 신호(correction)나 추적 위치에 따라 토치 위치(torch position)가 변하므로 추적 위치는 반드시 실세계 좌표계(world coordinate frame) 혹은 기준 좌표계(base coordinate frame)로 좌표 변환(transformation) 되어야 한다. 센서는 일정 거리(look-ahead distance) 용접 토치의 전방에 위치하므로 조인트의 위치에 관한 정보는 적당한 용접 경로(weld path or trajectory)를 만드는데 이용된다.

#### 4.1 좌표 변환(Coordinate Transformation)

카메라에서 측정한 추적점(tracking point)을 용접 토치가 따라가기 위해서는 기준 좌표계(base coordinate fame)에 대해서 추적점의 위치를 표현하여야 한다. 먼저 좌표계를 Fig. 13과 같이 정의하였다.

- {B} : 기준 좌표계 (base coordinate fame)
  - {C} : 카메라 좌표계 (camera coordinate fame)
  - {1} : 슬라이드 1의 좌표계 (slide 1 coordinate fame)
  - {2} : 슬라이드 2의 좌표계 (slide 2 coordinate fame)
  - {J} : 지그 슬라이드의 좌표계 (jig slide coordinate fame)
- $k$  번째 step에서 기준 좌표계에 대한 용접선의  $x$  좌표는 다음과 같이 나타나다.

$${}^B P(k)_{SORG} = {}^B J T(k) {}^J P_{SORG} \quad (7)$$

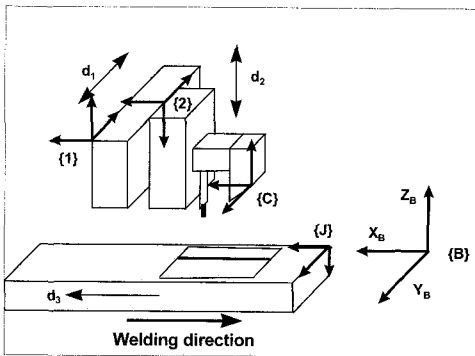


Fig. 13 Description of Coordinate Transformation

${}^J P_{SORG}$  :  $k$  번째 step에서 좌표계 {J}에 대한 용접선의 위치 벡터

${}^B J T(k)$  :  $k$  번째 step에서 좌표계 {B}에 대한 좌표계 {J}의 변환 행렬

또한  $k$  번째 step에서 비전 센서로부터 얻어진 조인트의 프로파일을 복합 변환(compound transformation)을 이용하여 기준좌표계에 대해서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$${}^B P(k)_{SORG} = {}^B 1 T(k) {}_2^1 T(k) {}_C^2 T(k) {}^C P_{SORG} \quad (8)$$

${}^B P(k)_{SORG}$  :  $k$  번째 step에서 기준 좌표계에 대한 토치 팁의 위치 벡터

${}^C P(k)_{SORG}$  : 좌표계 {2}에서 추적점의 위치 벡터

${}^B 1 T(k)$  :  $k$  번째 step에서 좌표계 {B}에 대한 좌표계 {1}의 변환 행렬

${}_2^1 T(k)$  :  $k$  번째 step에서 좌표계 {1}에 대한 좌표계 {2}의 변환 행렬

여기서,  ${}^C P(k)_{SORG}$ 는  $x$  성분은 0이고  $y, z$  성분은 각각 비전 센서에서 얻은  ${}^C y(k)_{profile}, {}^C z(k)_{profile}$  으로 이루어진다.

그리고  $k$  번째 step에서 기준좌표계에 대한 토치 팁(torch-tip)의 좌표는 기준 좌표계에 대한 슬라이드 1과 슬라이드 2의 복합 변환(compound transformation)으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$${}^B P(k)_{TORG} = {}^B 1 T(k) {}_2^1 T(k) {}^2 P_{TORG} \quad (9)$$

${}^B P(k)$  :  $k$  번째 step에서 기준 좌표계에 대한 토치 팁의 위치 벡터

${}^2 P$  : 좌표계 {2}에 대한 토치 팁의 위치 벡터로서 상수

$k$  번째 step에서 용접을 하기 위한 토치의 위치는  $(k-n)$  번째 step에서 카메라로부터 센싱한 추적점의 위치이다. 여기서  $n$  은 동일한 추적점이 카메라와 토치의 위치할 때의 step의 차이로 상수값으로 고정되어 있다. 이를 수식으로 나타내면 식 (8), (9)로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$${}^B P(k)_{TORG} = {}^C P(k-n)_{SORG} \quad (10)$$

또한 식 (8), (9), (10)로부터  $k$  번째 step에서 슬라이드 1, 2의 이송거리  $d_1(k), d_2(k)$  을 구할 수 있다.

## 4.2 Tracking Error Handling

용접선 추적 경로의 계산은 프로파일의 질에 의존적인 이미지 해석에 기초한다. 이는 추적 오차를 야기할 수 있으므로 추적 위치로 토치를 이동하기 이전에 수정해야 할 필요가 있다. 용접선이 급격히 변하지 않는다는 가정 하에서, 이 추적 위치들을 유효화 하고 기대되지 않는 갑작스런 이동을 피하기 위해 그들을 평활화 하는데 필터를 이용하였다. 필터로는 Y와 Z에 대한 최대 교정 신호(maximum correction)를 지정해 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 신호(maximum correction)보다 크면 그 위치값은 제외하게 된다. 또한, 용접선의 대략적인 방향을 예측하면서 과거의 추적 위치의 경향을 따라 용접선의 정보를 얻을 수 있도록 현재의 데이터에 가중치를 주는 이동 평균법을 사용하였다.

## 5. 결론

용접 자동화를 위한 연구로서 비전 시스템을 이용한 비전 처리(vision processing)와 용접선 추적 제어에 대해서 관찰 및 실험을 통하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 용접 공정의 3가지 단계, 즉 준비 단계, 용접 공정 실행 그리고 검사 단계 모두에 대하여 머신 비전(machine vision)을 새롭게 응용할 수 있도록 하기 위하여 효과적인 비전 처리 기법을 제시하였다.
- (2) 이러한 기법들을 이용하여 용접에서 중요한 용접 조인트와 용접 비드의 특징(feature)들을 정확히 추출해내도록 하였다.
- (3) 각 파라미터와 프로파일 등을 모니터링할 수 있도록 한글 그래픽 사용자 인터페이스용 소프트웨어를 개발하여 용접선 추적에 적용하였다.
- (4) 용접 비드와 용접 조인트의 기하학적 정보가 용접층의 순서를 지정하여 단층 용접뿐만 아니라 다층 용접에서도 유용함을 보였다.

## 참고 문헌

- (1) Agapakis, J. E., 1990, "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) 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.
- (5) 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," *The Transactions of Japanese Welding Society*, Vol. 7, No. 4, pp. 467~472.
- (6) Nakata, S., 1989, "Determination on Geometrical Arrangement of Optical Equipments and Photographic Parameters for Construction of Visual Sensing System," *The Transactions of Japanese Welding Society*, Vol. 7, No. 3, pp. 358~362.
- (7) Nayak, N., and Ray, A., 1993, *Intelligent Seam Tracking for Robotic Welding*, Springer -Verlag.
- (8) Yoo, Y. T., Kim, J. Y., Ro, K. B., Yang, D. J., Oh, Y. S., Im, K. G. and Kim, J. H., 2003, "Estimation of Laser Welding Behavior of SM45C Steels by Plume Monitoring," *Transactions of the Korean Society of Machine and Tool Engineers*, Vol. 12, No. 6, pp. 14~21.
- (9) Yoon, S. U., Kim, J. Y., Song, K. S. and Cha, Y. H., 2006, "The Development of Automatic Inspection System for Flaw Detection in Welding Pipe," *Transactions of the Korean Society of Machine and Tool Engineers*, Vol. 15, No. 2, pp. 87~92.