

研究論文

시각센서를 이용한 비원형 압축기 케이스의 자동용접시스템 개발에 관한 연구

박 현준* · 유 제용** · 나 석주** · 홍 성준*** · 강 형식***

A study on development of automatic welding system for compressor case using vision sensor

H. J. Park*, J. Y. Yu**, S. J. Na**, S. J. Hong*** and H. S. Kang***

Key word : Vision sensor(시각센서), Compressor case(압축기 케이스), Automatic welding system(자동용접장치), Angle velocity(각속도), Curve fitting(곡선 정합), Composite curve(합성 곡선)

Abstract

Vision sensor was used to track the weld line of the compressor case. The compressor case was fixed in jig equipped with the rotating system, and two torches having one degree of freedom was applied in automatic welding system. The radius of rotation for the compressor case is varying with each rotating angle, while, the angle velocity is constant. Therefore, an algorithm to extract the feature of the compressor case for varying rotation angle is needed. To overcome the above difficulties, the curve fitting and composite curve were used. The experiment to verify the proposed algorithm showed desirable results for tracking the welding line of compressor case.

1. 서 론

용접은 자동차, 조선, 항공기 및 다양한 금속접

합공업에 널리 이용되고 있는 근대 산업의 필수적인 생산기술이다. 그리고 용접공정은 고온, 고열 및 유해가스 발생 등으로 작업환경이 매우 열악할 뿐만 아니라 작업자의 기능에 따라 품질의 균일성

* 비회원, 현대정공(주) 기술연구소

** 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

*** 정회원, LG전자(주) 생산기술센터

이 많은 차이를 보이는 민감한 작업이므로 기계화 및 자동화가 필요한 분야이다. 특히 용접공정중에 변하는 조건(conditions)에 능동적으로 대처할 수 있는 조작기(manipulator)를 구현하기 위해서는 센서의 연구 및 개발이 필요하다¹⁾.

용접자동화에 이용된 센서는 접촉식 센서와 비접촉식 센서로 나눌 수 있다. 접촉식 센서는 구조가 간단하여 가격이 저렴하나 대상체와 물리적인 접촉이 요구되므로 박판이나 정확하게 형상을 정의하기 어려운 대상체의 경우에는 한계가 있고 스페터가 접촉부에 붙어 측정시 오차를 유발하는 단점이 있다. 본 연구에 이용한 시각센서는 비접촉식 센서로서 레이저를 보조광원으로 사용하고 광삼각법(optical triangulation)의 원리를 이용하기 때문에 레이저를 측정부에 조사한 뒤 반사되어서 센서로 돌아오기까지의 시간(time of flight)을 측정해서 위치정보를 얻는 방식이나 레이저 인터페로미터(interferometer) 방식에 비해 구조가 간단하고 저렴한 가격으로 측정시스템을 구성할 수 있고 용접부 형상을 시각센서로부터 3차원 좌표로 기술 할 수 있다는 장점이 있다^{2,3)}.

본 연구의 목표는 실시간 처리가 가능하면서 대상물의 형상을 정확하게 측정할 수 있는 시각센서를 이용하고 용접시 아크 및 스페터 등의 노이즈에 의한 영향을 줄이기 위해 선행측정법(preview sensing)⁴⁾을 활용하여 단면이 비원형이고 기둥으로 모델링(modeling)할 수 있는 압축기의 외관 형상을 측정하고 압축기 케이스(case)의 윗부분과 아래부분을 자동 용접하여 압축기 케이스를 생산하는 것이다. 대상물의 형상을 연속적으로 측정하기 위해 본 연구에서는 시각센서를 고정시키고 대상물을 지그 위에 올려놓고 일정한 각속도로 회전시켜 대상물의 형상을 연속적으로 측정하였다. 그리고 측정된 지점이 특정 시간 후에 1자유도(1 degree of freedom)의 직선운동을 갖는 토치의 위치에 도달하면 이 때 토치를 이동시켜 용접을 하도록 조작기를 설계하였다. 이 방식은 대상물을 고정시키고 시각센서와 토치를 일체시켜 함께 이동하면서 대상물의 전체적인 형상을 측정하면서 용접하는 방식에 비해 조작기의 크기가 작아질 뿐만 아니라 안정적인 형상 측정을 할 수 있다. 압축기 케이스의 자동용접시스템을 개발하기 위해서는 회전운동을 하는 대상체의 형상을 간단하고 효과적

으로 기술할 수 있는 좌표변환, 노이즈에 둔감한 영상처리기법, 시간에 따른 대상체의 형상을 연속함수로 표현하는 기하학적 모델링, 연속함수를 이용한 추적하는 알고리즘의 개발이 요구된다.

2. 시각센서

2.1 개요

시각센서는 Fig.1과 같이 CCD 카메라, 수동촛점 렌즈, 대역통과필터(narrow band pass filter), 다이오드 레이저(25mW) 및 원통형 렌즈로 구성되어 있다. CCD 카메라의 소자의 크기는 6.4mm(W)×4.8mm(H)로 768(W)×494(H)의 화소(pixel)로 이루어져 있다. 사용한 보조광원은 파장이 690nm인 적색 가시광의 다이오드 레이저이며, 내장된 원통형 렌즈에 의해 평면광으로 변화된다. 측정물에 투사된 레이저 빔은 대역통과필터를 통하여 카메라에 입사된다. 대역통과필터는 690nm 파장대의 레이저 광원만을 선택적으로 통과시킬 수 있는 필터로 카메라에 입사되는 아크광의 영향을 많이 줄일 수 있다⁵⁾. 수동촛점 렌즈는 대상물로부터 100mm 떨어진 위치에서 40mm×90mm의 구역을 볼 수 있도록 촛점거리(focal length)가 15mm이며 대물거리가 90mm에서 ∞까지 가능한 렌즈를 선택하였다.

시각센서의 성능을 결정하는 중요한 인자는 깊이 방향 및 측면 방향의 측정 범위(field of view :

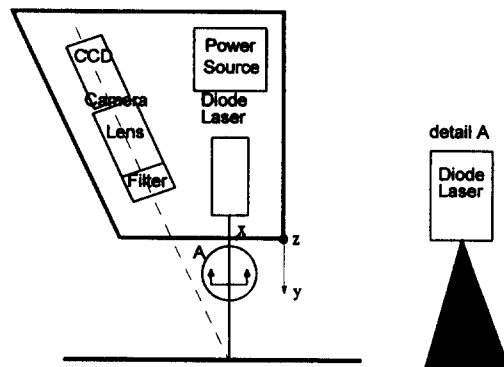


Fig. 1 Schematic diagram of vision sensor

FOV)와 분해능(resolution)이다. 측정 범위와 분해능은 서로 상반되는 관계에 있다. 대부분의 경우 분해능은 평균분해능으로 표시하는데 본 연구에서 설계한 시각센서의 경우 깊이 방향의 평균 분해능은 약 200 μm 이고 측면 방향의 평균 분해능은 100 μm 이다.

2.2 좌표변환

2.2.1 좌표계의 정의

Fig. 2에 도시한 것처럼 4가지의 좌표계가 정의된다. 첫째는 대상물을 올려놓은 지그에 회전축을 높이 축으로 정한 극좌표계 C_b 이다. C_b 는 기준 좌표계(base frame)로서 고정되어 있다. 두 번째는 C_b 를 높이방향으로 평행 이동시켜 대상물에 부착하여 대상물과 함께 회전하는 극좌표계 C_o 로서 대상물 좌표계(object frame)이다. 세 번째는 센서박스 끝단 모서리 중앙을 원점으로 정한 직각좌표계인 C_s 로서 센서좌표계(sensor frame)이다. 그리고 네 번째는 카메라의 영상에서 정의되는 화상좌표계(image frame) C_i 이다.

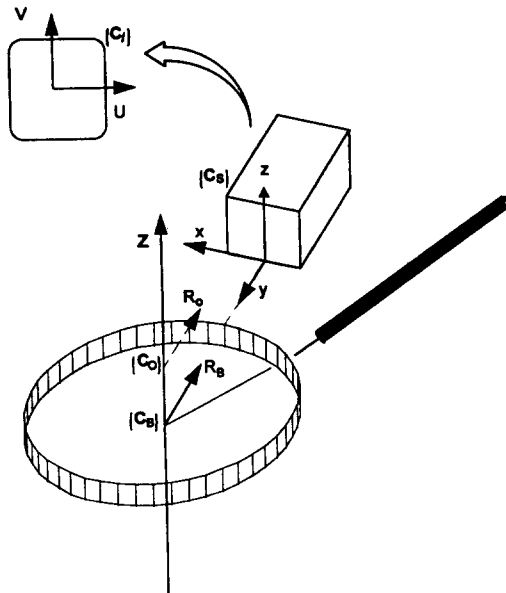


Fig. 2 Coordinates of transformation

Fig. 3에서 도시한 바와 같이 센서의 원점과 지그의 회전축을 연결하는 직선과 회전축과 토치를 연결한 직선 사이에 형성된 각을 선행측정각(preview angle)으로 정의한다. 그리고 대상체의 레이저 띠가 맺힌 점과 지그 회전축을 연결한 직선과 회전축과 토치를 연결한 직선 사이의 각을 사잇각(interval angle)으로 정의한다.

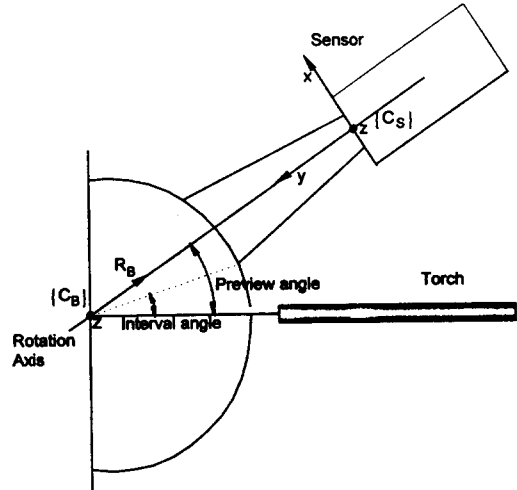


Fig. 3 Definition of preview angle and interval angle

2.2.2 센터링 작업

토치를 대상물에 밀접하게 근접시키기 위해서는 측정된 대상물의 형상을 정확하게 측정하는 것과 측정된 형상 정보를 사용할 시간을 결정하는 사잇각을 정확하게 아는 것이 중요하다. 그러나 시각센서로 직접 측정할 수 있는 것은 레이저 띠가 맺힌 지점들의 거리일 뿐 사잇각에 대한 정보는 직접 얻을 수 없다. 따라서 Fig. 3에서 표현한 바와같이 센서의 중심에서 y축 방향으로 그은 직선이 지그의 회전중심을 지나도록 센서위치를 확인하고 보정하는 센터링 작업을 통해서 화상의 수직 중심선상에 맺힌 지점들의 사잇각을 알 수 있다.

화상의 수직 중심선상에 맺히는 점들은 센서좌표계(sensor frame) C_s 로 좌표변환을 하여도 모두 동일한 x좌표값을 갖는다. 이러한 성질을 이용하

여 지그의 회전축이 화상의 수직 중심선상에 있도록 하기위해 지그의 회전축에 직경이 6mm인 봉 (rod)을 회전축에 고정하여 봉에 맺힌 레이저띠가 화상의 수직 중심선상에 있도록 시각센서를 설치한다. 센터링 작업을 행한 후 화상의 수직 중심선상에 맺힌 대상체의 지점의 사잇각은 선행측정값과 같다.

2.2.3 기하학적 관계

지그의 회전축을 기준으로 하여 대상물의 형상과 토치의 위치를 표현하도록 간단한 삼각함수와 기하학적 관계를 이용하여 좌표변환을 하면 하나의 화상에서 얻은 여러 지점들로부터 지그의 회전축부터 대상물까지의 거리와 사잇각에 대한 정보를 얻을 수 있다.

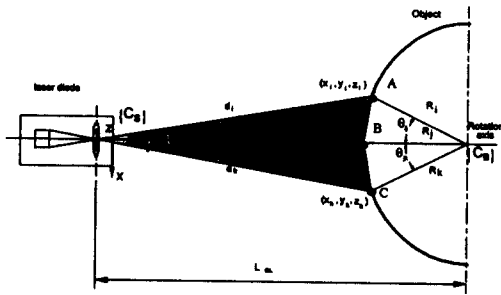


Fig. 4 Geometric relation between sensor coordinates and base polar coordinates

Fig. 4에서 L_{OL} 은 센서좌표계의 원점과 지그의 회전축 사이의 거리로 알고 있는 값이고, R_i , R_j 와 R_k 는 지그의 회전축에서 대상물까지의 거리로 정의하는 대상물의 회전반경이며, d_i , d_j 와 d_k 는 센서좌표계의 원점에서 회전반경과 사잇각을 측정하고자 하는 지점까지의 거리로 교정 작업에 의하여 직접 구할 수 있는 정보이다. d_{ki} 와 d_{jk} 는 A, B와 B, C 사이의 거리로 평면에서 두 점사이의 거리를 구하는 식에 의해 구한다.

d_{ki} 와 d_{jk} 는 두 직선의 사잇각이며 θ_{ki} 와 θ_{jk} 는 구하고자하는 사잇각이다.

R_{ki} 와 θ_{jk} 를 구하는 과정은 다음과 같다.

$$d_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2-1)$$

$$d_{jk} = \sqrt{(x_j - x_k)^2 + (y_j - y_k)^2} \quad j, k = 1, 2, \dots, N \quad (2-2)$$

여기서 N은 시각센서로 부터 측정된 화상 (frame)의 갯수이다.

$$\cos(b_{jk}) = \frac{d_j^2 + d_k^2 - d_{jk}^2}{2 \cdot d_j \cdot d_k} \quad (2-3)$$

$\sin(b_{jk}) = \sqrt{1 - \cos^2(b_{jk})}$ (단 b_{jk} 가 예각인 경우만 고려한다)

$$R_k \cos(\theta_{jk}) + d_k \cos(b_{jk}) = L_{OL} \quad (2-4)$$

여기서 $t = L_{OL} - d_k \cos(b_{jk})$ 라 하면

$$\cos(\theta_{jk}) = \frac{t}{R_k} \quad (2-5)$$

$$\sin(\theta_{jk}) = \frac{d_k \sin(b_{jk})}{R_k} \quad (2-6)$$

$$\left(\frac{t}{R_k}\right)^2 + \left(\frac{d_k \sin(b_{jk})}{R_k}\right)^2 = 1 \quad (2-7)$$

식 (2-7)을 전개하고 정리하면

$$R_k = \sqrt{d_k^2 \sin^2(b_{jk}) + t^2} \quad (2-8)$$

$$\theta_{jk} = \cos^{-1}\left(\frac{t}{R_k}\right) \quad (2-9)$$

R_i 와 θ_{ij} 를 구하는 과정도 동일하다.

하나의 화상에서 레이저 띠가 맺힌 임의의 수평 좌표에 대하여 사잇각과 회전반경의 순서쌍을 얻을 수 있으므로 레이저 띠를 사잇각과 회전반경의 함수로 나타낼 수 있다. 회전하는 대상물의 경우는 사잇각이 누적된 측정시간과 비례하므로 사잇각을 독립변수로 선정하는 것이 타당하다고 볼 수 있다.

3. 영상처리(vision processing)

3.1 영상처리 기법 및 목적

용접선 추적시 수행하는 기존 영상처리의 목적은 입력된 하나의 화상에서 간극(gap)의 위치 및 크기, 2개의 면의 교점, 단차의 위치 및 높이차 등의 용접부의 특성을 나타내는 위치를 검출하는 것이다. 그러나 본 연구의 영상처리 목적은 회전반경의 경향을 얻기 위해 모든 레이저 띠의 중심을 탐색하지 않고 적은 수의 데이터를 이용하여 곡선 정합 등의 분석을 통해서 회전반경의 경향을 알아냄으로서 영상처리 시간을 줄이고 실시간에 압축기 케이스의 외관 용접을 수행하는 것이다.

일반적으로 레이저띠의 추출방법에는 최대값 추출 방법, 농도값 히스토그램을 이용하는 방법, 레이저 강도 및 띠의 두께를 이용한 임계값 처리 방법, 공간여파(spatial filtering)의 원리를 이용하는 방법등이 있다.^{6,7)} 본 연구에서는 여러 영상처리 방법중에 화상 내에 존재하는 아크, 스파터 등의 노이즈(noise)에 강한 특성을 갖는 공간여파(spatial filtering) 방법⁸⁻¹⁰⁾에 직각 필터를 채용하여 처리시간을 대폭 줄인 영상처리 알고리즘을 압축기 케이스 용접에 적용하였다.

3.2 기하학적 모델링(geometric modeling)

하나의 화상에서 세선화를 통해 구한 데이터에서 레이저 띠가 내포한 대상물의 윤곽을 곡선정합을 통하여 사잇각에 대한 회전반경의 함수로 표현하는 단계이다.

곡선정합은 측정된 정보를 잘 끼워 맞추는 함수 즉 수학적 모델을 찾는 일반적인 과정이다. 곡선정합에는 두 가지 접근 방법이 있다. 하나의 접근 방법은 내삽(interpolation)으로서 측정된 위치에서 측정값을 반드시 지나는 함수를 구하는 방법이다. 두 번째 접근 방법은 최소자승법(least-square data fitting)으로 측정위치의 측정값이 정확하지 않을 경우에 가장 근접하게 정보에 정합 시키는 함수를 찾는 방법이다. 내삽 방법은 측정 정보는 정확하나 정합함수에 대해서는 모호할 때 이용하는 방법이고, 반대로 최소자승법은 측정 정보가 어느

정도 변동(variation)을 가질때 이를 가장 최소화하는 수학적 모델링 알고리즘이다.¹¹⁾

본 연구에서는 아크광이나 스파터 등의 노이즈가 존재하는 환경에서 대상물의 회전반경을 측정하기 때문에 정보가 정확하지 않을 수 있으므로 하나의 화상에서 얻을 수 있는 부분 곡선(curve segment)을 최소자승법에 의해 2차식으로 부분 윤곽의 함수를 구한다. 그런 다음 연속적인 두 화상에서 생성한 두 개의 2차식을 하나의 함수식으로 측정 구간의 모든 점을 표현하는 단계로 Fig. 5에서 도시한 바와 같이 첫 번째 곡선의 중앙 점 P_n 와 두 번째 곡선의 중앙점 A_n 을 매끄럽게 연결하는 함수를 구한다. 함수를 구하는데 사용하는 구속조건은 양 중앙점에서 함수값이 같고 이 점에서 기울기가 같도록 하는 4개의 구속조건을 만족하는 3차식을 구하여 측정구간에 내삽한다. 그리고 계속해서 같은 방법으로 다음 측정구간에 대하여 3차식을 생성한다. 2개의 생성된 곡선은 교점에서 함수값과 기울기가 같은 C_1 연속성을 만족하는 합성곡선을 형성한다.¹²⁾

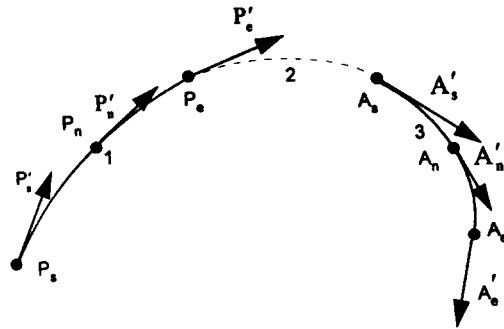


Fig. 5 Processing of geometric modeling

4. 추적 알고리즘

기존의 추적방식에서는 좌표변환을 행하지 않으므로 하나의 영상에서 지그의 회전축에 대응하는 센서 중앙의 화상 좌표값만이 유용한 정보이기 때문에 각 화상에서 얻은 대상물의 형상에 대한 정보는 측정시간에 대하여 이산적 형태이다. 따라서 대상물의 기하학적 형상을 정밀하게 얻기 위해서

는 샘플링시간을 짧게 하여 단위시간당 측정 데이터 수를 증가시켜야 한다. 그러나 영상처리에서 가장 긴 처리시간이 요구되는 부분이 화상 이산화 작업이며 이 작업은 일정 시간 이상의 처리시간을 요구하기 때문에 샘플링시간을 줄이는 데는 한계가 있다. 또한 본 연구에서는 생산성 향상을 위해 용접토치를 2개 사용하므로 2개의 센서가 필요하기 때문에 샘플링시간은 하나의 센서를 이용하는 경우에 비해 약 2배 정도 길어지게 된다. 또한 측정정보가 이산적인 형태이므로 측정 데이터 사이를 직선으로 보간할 수밖에 없기 때문에 급격하게 형상이 변화하는 구간은 사잇각에 대한 회전 반경의 변화가 크므로 이 구간을 일정한 기울기를 갖는 직선으로 추적할 때는 미세한 추적오차를 발생시킬 수 있다.

본 연구에서 제안한 추적 알고리즘은 곡선정합과 기하학적 모델링에 의하여 각 측정구간에서 대상물의 기하학적 형상을 회전반경의 연속함수로 표현하므로 전체 영상처리를 구성하는 각 단계(영상이산화 작업, 세션화 작업, 곡선정합 작업, 형상 분석 작업) 사이에 연속함수를 이용하여 토치를 구동시키므로 대상물을 보다 정밀하게 추적할 수 있다. 또한 대상물의 형상이 급격하게 변화하는 지점에서도 기존 추적방법은 평균 이동속도로 대상체를 추적하나 제안된 추적 방법은 이러한 지점에서는 큰 속도로 대상물을 추적할 수 있으므로 형상의 변화가 급격한 지점에서도 대상물과 토치를 밀착시켜 대상물을 추적할 수 있다.

5. 실험

5.1 실험장치

실험장치는 조작기, 용접기, 측정부 및 486 IBM PC로 구성되어 있는데, Fig. 6은 실험장치의 주요부분을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 압축기 케이스 용접의 생산성 향상을 위해 2개의 토치를 사용한다. 조작기의 구성은 대상물을 올려놓고 회전시키는 지그(jig), 대상물의 위치를 고정시키는 고정 치구인 클램프(clamp) 장치와 대상물의 위치를 중앙에 놓을 수 있게 하는 센터링 장치(centering device) 등으로 구성된 기구부와 토치

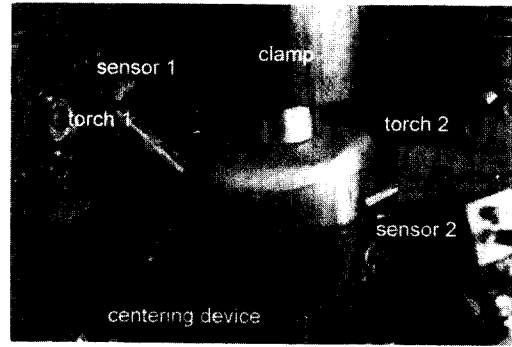


Fig. 6 Photograph of vision sensor, torch and jig system

구동을 위한 AC 서보 모터(servo motor), 감속기 그리고 볼 스크류로 구성되어 있고 25 μ m의 정밀도를 갖는 구동부로 구성된다. 측정부는 시각센서와 비전보드로 구성되어 있다.

실험내용은 크게 아래와 같이 세가지로 나누어진다.

1. 시각센서로 부터 얻을 수 있는 사잇각과 회전 반경에 대한 신뢰성을 검토하기 위해 회전반경의 측정 오차를 얻기 위한 실험
2. 기존의 추적 알고리즘과 본 연구에서 제안된 기하학적 모델링의 의한 추적 알고리즘의 특성 비교
3. 아크용접 공정중에 발생하는 아크광, 스파터 등의 노이즈가 포함된 화상에서 레이저 락의 중심을 추출하는 영상처리 기법의 강건성과 추적의 정확성 여부를 검토하기 위한 용접실험

5.2 실험 및 고찰

5.2.1 센서의 신뢰도 실험

교정한 센서를 사용하여 좌표변환의 신뢰성을 검토하기 위해 직경이 60mm인 원기둥을 센서좌표계의 원점으로부터 원기둥의 중심이 100mm떨어진 지점에 위치시키고 회전반경을 측정하는 실험을 수행하였다. Fig. 7에 나타난 바와 같이 화상좌표계의 중앙에서 측정 오차가 가장 작았고 중앙에서 멀어질수록 오차의 크기가 중앙에서 떨어진 거리에 비례하여 커지는 것을 알 수 있다. 이러한 현상

은 화상의 중앙에서 실제 측정이 주로 이루어지므로 센서 교정시 화상의 중앙부분에서 중점적으로 교정작업을 행하였고 시각센서에서 멀어질수록 분해능이 낮아지기 때문에 발생하는 측정정보의 오차이다.

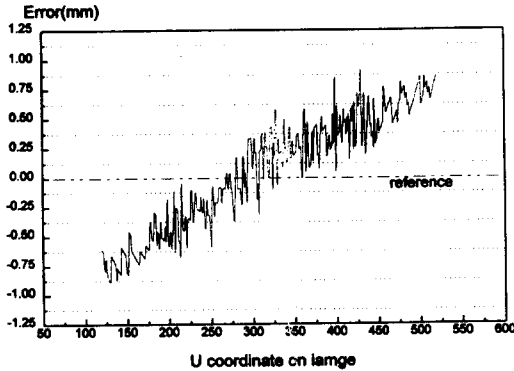
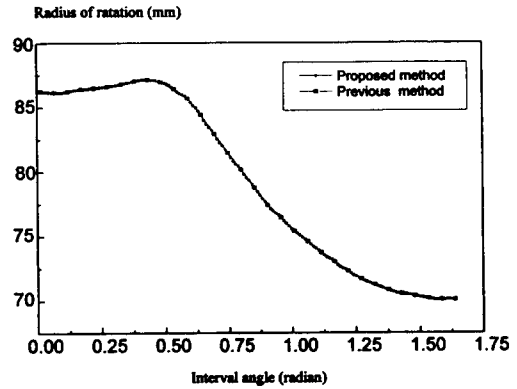


Fig. 7 Error in measurement of cylinder radius

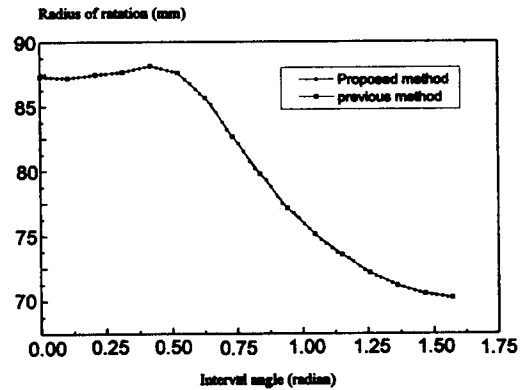
5. 2. 2 추적실험

Fig. 8 (a)는 지그의 회전속도가 2rpm일 때 기존의 방식과 제안된 방식에 의해서 생성된 토치의 이동위치를 시간에 정비례하는 사잇각에 대하여 표시한 것이다. 여기서 측정 데이터들을 연결한 직선의 기울기는 토치의 이동속도와 정비례한다. 추적실험시 선행측정각은 $\pi/6$ 이고 지그의 회전 속도가 2rpm이므로 선행측정시간은 2.5초이다. 그리고 센서 한 대 당 소요되는 영상처리 시간은 약 0.075초로 두 대의 센서에 소요되는 영상처리 시간은 0.15초가 소요되나 선행측정시간과 샘플링시간의 비(ratio)가 정수가 되게 하고 본 연구에서 제안한 방법과 효과적으로 비교하기 위해 샘플링시간을 0.25초로 선정하였다.

Fig. 8 (a)에서 도시한 바와 같이 제안한 알고리즘을 사용하면 기존의 추적 방식보다 4배 이상의 빈도로 토치를 구동할 수 있음을 알 수 있다. 회전반경의 변화가 작은 구역에서는 두 방식이 모두 일정한 추적속도를 갖는 비슷한 경향을 보인다. 그러나 회전반경의 변화가 큰 구역에서는 기존의 방식은 측정 정보사이를 1차의 직선으로 내삽하기 때문에 추적속도가 일정하나 제안된 방식에서는



(a) Angular velocity : 2rpm



(b) Angular velocity : 4rpm

Fig. 8 Comparison between previous and proposed method

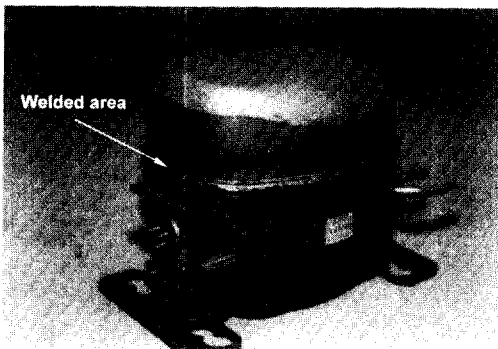
3차식의 내삽을 사용하였기 때문에 추적속도가 단계로 변화하면서 대상체를 보다 정밀하게 추적함을 알 수 있다.

Fig. 8 (b)는 생산성 향상을 위해 지그의 회전 속도를 크게 할 경우에는 제안된 추적방식이 더욱 효과적임을 보여준다.

5. 2. 3 용접실험

Fig. 9는 본 연구에서 선정한 공간여과법으로 용접시 노이즈를 제거하면서 레이저 락의 중심을 인식하여 대상체의 윤곽을 추출하고 대상물의 용접부를 추적하여 용접한 결과이다. 중간에 용접이

끊어진 부분이 없으며 전체적으로 비드(bead)의 두께가 일정하여 용접이 양호하게 이루어진 것을 알 수 있었다. 용접이 끊어진 부분이 없고 비드의 두께가 일정한 것으로부터 용접중 토치가 대상물의 용접부에 밀착한 정도가 일정함을 알 수 있다. 특히 형상이 급격하게 변하는 부분의 용접도 양호함을 통해 대상물의 형상이 급격히 변화하여도 용접 토치가 압축기 케이스에 밀착하여 추적했음을 알 수 있다. 또한 여러번의 용접실험을 통하여 노이즈에 대한 공간여과법의 강건성을 검토할 수 있었고 추적 알고리즘의 안정성을 입증할 수 있었다.



Welding current : 280A
Voltage : 31V
Angular velocity : 2rpm
Min. linear velocity : 14.66 mm/s

Fig. 9 Photograph of welded area in compressor case

6. 결 론

좌표변환을 통하여 하나의 화상에 맺힌 레이저 락을 사잇각과 회전반경의 순서쌍으로 표현할 수 있어 측정시간과 비례관계에 있는 사잇각을 독립 변수로 갖는 회전반경의 함수로 레이저 락을 표현할 수 있다. 또한 곡선정합을 사용하여 하나의 화상에 맺힌 레이저의 락을 사잇각에 대한 회전반경의 함수로 표현하면 곡선정합은 측정 데이터를 공간상에서 필터링을 하는 효과를 생성하므로 측정

오차를 줄일 수 있었다. 따라서 단면이 비원형인 압축기 케이스의 용접시 측정된 정보로부터 압축기 케이스의 형상을 회전반경의 C_i 연속성을 만족하는 3차식의 함수로 기하학적 모델링을 할 수 있다.

기하학적 모델링을 통하여 얻은 회전하는 압축기 케이스 형상의 타당성 검토를 위한 측정실험과 용접실험을 통하여 대상물의 전체 형상을 나타내는 함수는 모든 지점에서 매끄럽고 연속인 함수임을 확인할 수 있었고 모든 측정구간을 3차의 함수로 표현하여 측정구간을 다단계의 이동속도로 추적할 수 있는 제안된 알고리즘은 압축기 케이스의 형상 변화가 급격한 지점에서도 효과적으로 추적하여 양호한 용접품질을 갖는 압축기를 생산할 수 있음을 보였다.

참 고 문 헌

1. D. Grannan, "The New Weld Joint Trackers- Their History and Technology ", Welding Journal, Vol. 65, No. 3, 1986, pp49-51
2. 신 정식, "겹치기이음에서의 용접선 추적과 아크 데이터 모니터링 시스템에 관한 연구", 한국과학기술원 석사학위논문, 1991
3. 최 동필, "박판용접에 있어서 시각센서를 이용한 용접선 추적과 용접변수 설정에 관한 연구", 한국과학기술원 석사학위논문, 1994
4. J. Hanright, "Robotic Arc Welding under Adaptive Control-A Survey of Current Technology", Welding Journal, Vol. 55, No. 11, 1986, pp19-24
5. A. L. Lenef, et al, "Optical emissions from arcs and their effects on the performance of welding robot vision systems", Applied Optics, Vol. 24, No. 16, 1985, pp2587-2595
6. N. Otsu, "A Threshold Selection Method from Grey-Level Histograms", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, SMC. 9, No. 1, 1979, pp62-66
7. W. H. Tsai, "Moment-Preseving Thresholding: A New Approach", Computer Vision, Graphics, and Image

- processing, Vol. 29, 1985, pp377-393
8. J. E. Agapakis, et al, "Joint Tracking and Adaptive Robotic Welding Using Vision Sensing of the Weld Joint Geometry", Welding Journal, Vol. 55, No. 11, 1986, pp 36-41
 9. W. F. Clocksin, et al, "An Implementation of Model-Based Visual Feedback for Robot Arc Welding of Thin Sheet Steel", The Internal Journal of Robotics Research, Vol. 4, No. 1, 1985, pp13-26
 10. 손 영탁, "로봇트 아크용접 공정을 위한 용접 접합부의 시각 인식 및 추종", 한국과학기술원 석사학위 논문, 1995
 11. R. Sedgewick, "Algorithms in C", Addison Wesley, 1990
 12. M. E. Mortenson, "Geometric Modeling", John Wiley & Sons, 1985