

研究論文

선박 소조립 공정용 로봇 자동교시 시스템의 구현

김정호* · 유중돈* · 김진오** · 신정식** · 김성권**

Implementation of Automatic Teaching System for Subassembly Process in Shipbuilding

J. H. Kim, C. D. Yoo, J. O. Kim, J. S. Sin and S. K. Kim

Key Words : Automatic teaching system, Subassembly process, Laser/vision sensor, Image processing, Dynamic programming, Sub-optimum weld path.

Abstract

Robot systems are widely utilized in the shipbuilding industry to enhance the productivity by automating the welding process. In order to increase productivity, it is necessary to reduce the time used for robot teaching. In this work, the automatic teaching system is developed for the subassembly process in the shipbuilding industry. A laser/vision sensor is designed to detect the weld seam and the image of the fillet joint is processed using the arm method. Positions of weld seams defined in the CAD database are transformed into the robot coordinate, and the dynamic programming technique is applied to find the sub-optimum weld path. Experiments are carried out to verify the system performance. The results show that the proposed automatic teaching system performs successfully and can be applied to the robot system in the subassembly process.

1. 서 론

최근 조선 산업에서 용접 공정의 자동화를 통한 생산성을 향상시키기 위하여 로봇의 사용이 증가하고 있다. 아크 용접은 선박이나 대형 구조물의 조립시 널리 사용되는 접합 공정으로써, 로봇을

이용한 아크 용접 공정을 자동화 시키기 위하여 Off-line Programming (OLP) 시스템이 제안되고 있다¹⁾. 이와 같은 OLP 시스템은 용접선의 위치 정보를 갖고 있는 CAD 데이터베이스 (database), 용접선의 위치를 측정하는 센서 시스템을 포함하고 있으며, 로봇 시스템에 정확한 용접선의 위치와 경로 및 용접 조건에 관한 정보를 제공한다. 선

* 정회원, 한국과학기술원 자동화 및 설계공학과

** 정회원, 삼성전자 생산기술연구센터 자동화연구소

박의 소조립 공정은 대조립 공정과 달리 이동되는 용접 부재의 종류와 그 기준 위치를 인식해야 하는 어려움이 있고, 다품종 소량 생산이므로 교시 시간이 많이 소요되어 OLP 시스템을 적용하는 데 적합하다. 자동 교시 시스템은 OLP 시스템의 일종으로 유사한 기능을 갖고 있으며 로봇을 이용한 용접 공정에서 교시에 소요되는 시간을 단축시키는 데 목적이 있다.

본 연구의 로봇 자동 교시 시스템은 Fig.1에 보인 바와 같이 선박 소조립에 사용되는 판넬(panel)의 종류, 용접선의 대략의 위치 및 CAD의 용접선 위치 자료 등을 입력하면 센서를 이용하여 정확한 용접선의 위치를 측정하고 좌표 변환 및 합리적인 용접 경로를 계산하여 로봇 시스템에 이에 관한 정보를 제공한다. 용접선의 위치를 측정하기 위하여 레이저와 시각 센서를 이용한 용접선 추적 장치가 응용된다. 이와 같은 센서는 광삼각법(optical triangulation)의 원리를 이용하여 용접선과 센서 간의 거리를 측정하며, 용접선의 자동 추적 및 용접 부위의 형상 정보를 이용하여 용접 전류나 용접 속도의 제어에 응용하고 있다^{2,3)}. 센서의 종류는 광원으로 사용하는 레이저의 종류에 따

라 크게 구조광(structured beam)을 사용한 방식과 주사광(scanning beam)을 사용한 방식으로 구분되며, 수광 센서로는 2차원 CCD 카메라나 1차원 CCD array를 사용하고 있다^{4,5)}. 광원의 차이에 따른 장단점이 존재하나, 삼각법의 원리를 적용하여 센서로부터 용접선까지의 거리를 측정하고 있다.

선박 건조시 소조립 공정의 특징은 판넬 위에 다수의 보강재(stiffener)를 주로 직선 필렛(fillet) 용접으로 접합하며, 용접선의 위치는 CAD 자료로 주어진다. 본 연구에서는 소조립 공정용 자동 교시 시스템의 개발을 하기 위하여 시각 센서를 설계하여 제작하고, 보정 장치(calibration tool)를 이용하여 효율적으로 센서를 보정하였다. 또한, 화상 처리 방법으로는 직선 필렛 용접 전용으로 노이즈(noise)의 영향에 강건하도록 Arm 방법⁶⁾을 변형시켜 적용하였다. 용접선의 시작점과 끝점 및 용접선의 방향을 인식하여 로봇 좌표계로부터 판넬 좌표계의 좌표계 변환을 계산하였다. CAD 자료로부터 준최적의(sub-optimum) 용접 경로를 실시간에 계산하기 위하여 동적 프로그래밍(dynamic programming) 방법⁷⁾을 적용하였다.

2. 센서의 설계 및 보정

2.1 센서의 설계

센서의 주된 사용 목적이 대형 구조물의 필렛 용접선의 위치를 측정하기 위한 것이므로 측정 범위가 넓어야 하며, 센서의 장착 위치가 아크 용접용 로봇의 (가반중량 : 6 kg) 팔 끝 부위이므로 센서의 중량과 크기를 최소화하는 것이 요구되었다. 센서의 측정 범위는 소조립 공정 자동화 시스템의 사양과 연계되어 있으며, z 방향의 최소 depth of field (DOF)는 200mm, y 방향의 최소 field of view (FOV)는 40mm 이며 위치 정밀도는 용접봉 직경 (1.2mm)의 1/2 이내로 설정하였다 (Fig. 2). 센서의 중량은 대략 500g으로 정하였고, 용접 환경이 스펀터, fume, 고온 및 강한 아크빛 등으로 인하여 열악한 점을 고려한 설계가 요구되었다.

이와 같은 시스템 사양은 Fig.2에 나타난 센서의 설계 변수 들로 표현할 수 있으며, 카메라 모델링

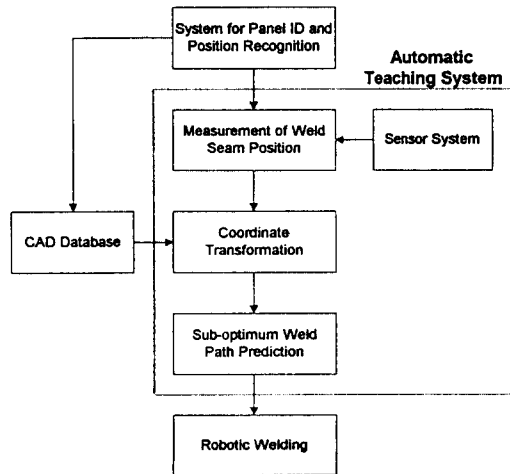


Fig. 1 Diagram of OLP and Automatic Teaching systems

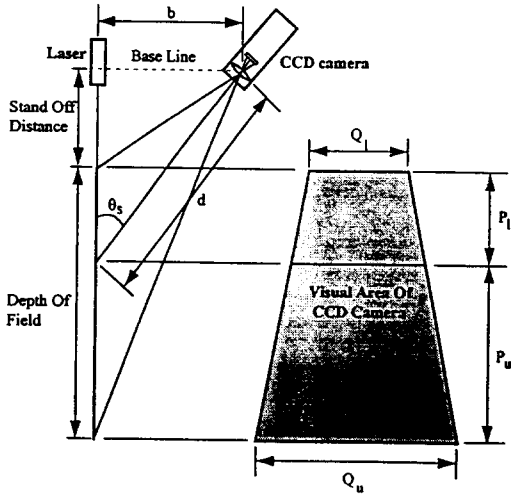


Fig. 2 Design parameters of vision sensor
관계식에 의해서 설계 변수들을 결정할 수 있다⁸⁾.

$$P_i = \frac{mdH}{2dsin|\theta_s| + mH\cos\theta_s} \quad (1)$$

$$P_u = \frac{mdH}{2dsin|\theta_s| - mH\cos\theta_s} \quad (2)$$

$$Q_1 = \frac{2mdV\sin|\theta_s|}{2dsin|\theta_s| + mH\cos\theta_s} \quad (3)$$

$$Q_u = \frac{2mdV\sin|\theta_s|}{2dsin|\theta_s| - mH\cos\theta_s} \quad (4)$$

$$m = (d - f) / f \quad (5)$$

이때, m 은 카메라 렌즈의 배율 (magnification factor) 을 나타내며, d 는 CCD 카메라의 광축과 슬릿광 면이 만나는 점과 CCD 카메라의 렌즈 중심과의 거리, s 는 레이저와 광축간의 분리각, f 는 카메라 렌즈의 초점거리, H 와 V 는 CCD 카메라의 감광 소자의 가로와 세로의 크기를 각각 나타낸다. 깊이 방향, 측면 방향의 평균 분해능인 R_D 와 R_L 은 다음과 같다.

$$R_D = \frac{P_i + P_u}{N_H} \quad (6)$$

$$R_L = \frac{P_i Q_u + P_u Q_1}{N_v (P_u + P_i)} \quad (7)$$

이때, N_H 와 N_v 는 각각 CCD 센서의 가로와 세로 방향의 화소수이다.

센서의 측정 정밀도와 측정 범위는 일반적으로 보완 관계이므로, 센서의 측정 범위를 크게 하면 측정 정밀도는 낮아진다. 위의 식을 이용하여 요구되는 센서의 측정 범위 및 정밀도를 계산하고, 요구 조건을 만족시키는 설계 범위에서 센서의 크기를 최소화할 수 있는 설계값을 센서의 사양으로 정하였다.

센서는 조립 및 유지 보수를 용이하게 할 수 있도록 케이스, 센서 블록, 광학부의 3부분으로 나누어 설계되었다. 최대 용량 25mW의 diode 레이저 (690nm) 와 원통형 렌즈 (cylindrical lens) 를 이용하여 구조광을 용접선 주위에 조사하였고, 반사광을 필터 (narrow band interference filter) 를 통하여 CCD 카메라로 수광하였다. 용접시 발생하는 열 영향, 스파터 및 fume 등의 영향을 줄이기 위하여 센서 블록을 수냉식으로 냉각시켜 레이저와 카메라를 보호하였고, fume이 광학계에 미치는 영향을 줄이기 위하여 압축공기를 센서의 앞부분에 불어주도록 하였다. 또한, 스파터 방지용 판 (spatter proof) 을 필요에 따라 부착시킬 수 있도록 설계하였다.

2.2 센서 보정

2차원 화상으로 부터 용접선의 3차원 정보를 산출하기 위하여 센서의 보정이 요구된다. 공간상의 한 점 $P(x, y, z)$ 가 카메라의 영상좌표 $P(U, V)$ 에 대응된다면 이때의 관계식은 아래와 같다⁹⁾.

$$x = \frac{m_{11} + m_{21}V + m_{31}}{m_{14}U + m_{24}V + 1} \quad (8)$$

$$y = \frac{m_{12} + m_{22}V + m_{32}}{m_{14}U + m_{24}V + 1} \quad (9)$$

$$z = \frac{m_{13} + m_{23}V + m_{33}}{m_{14}U + m_{24}V + 1} \quad (10)$$

이때, m_{ij} 는 영상 좌표로부터 공간상의 좌표로의 변환을 나타내는 행렬의 요소이며, 이를 결정하려면 4점 이상의 공간상의 좌표값과 그에 해당하는

영상 좌표값이 필요하다.

일반적으로 센서의 보정을 위하여 공간상의 기준점 (reference point) 의 정확한 위치가 필요하므로 보정 상자 등의 기구를 이용한다. 센서의 보정을 효율적으로 수행하고 정밀도를 높이기 위하여 Fig. 3과 같은 보정 기구를 설계하여 공간상의 180개의 기준점 (10점/step 18step) 에 대한 정보를 최소화승 오차해를 구하여 보정을 수행하였다.

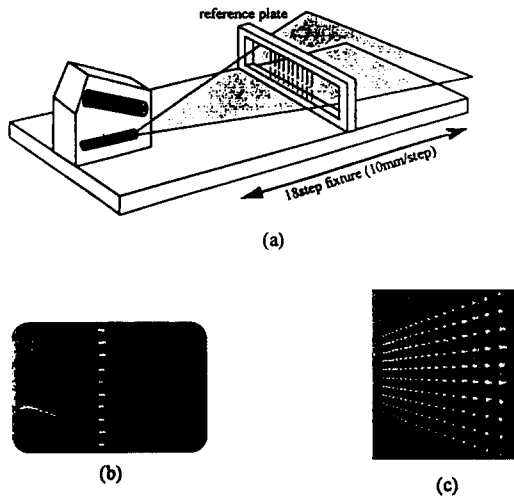


Fig. 3 Calibration device and captured images
 (a) calibration setup-reference plate and its fixture (b) capture 10 calibration point at each step (c) widely spread reference point in image after processing 18 step

3. 화상 처리

3.1 슬릿광의 추출

CCD 카메라가 대역 통과 필터 (690nm) 를 통하여 받아들인 반사된 슬릿광은 일정한 폭을 가지고 있다. 슬릿광 단면의 빛의 세기 분포가 가우시안 분포 (Gaussian distribution) 와 유사하므로 슬릿광 단면의 중심을 찾는 방법으로 다음과 같이 수행하였다. 슬릿광의 폭과 비슷한 크기의 창 (window) 을 설정하여 슬릿광을 가로지르는 방향으로 진행하며, 창 내의 밝기 값을 합하여 최대값을 가지는

점을 슬릿광의 중심으로 결정하였다. 창의 크기가 w 이고 I 번째 행에서 n 번째 창 내의 밝기 값의 합 $I_{i,n}$ 은 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$I_{i,0} = Gr(i,0) + Gr(i,1) + \dots + Gr(i,w-1) \quad (11)$$

$$I_{i,n} = I_{i,n-1} - Gr(i,n-w/2-1) + Gr(i,n+w/2) \quad (12)$$

이와 같은 방법으로 영상을 처리하여 추출된 슬릿광의 중심점들만 가지고 후처리를 하게 되면 정보의 양이 감소되어 수행 속도가 빨라지며, 적분형 필터의 역할도 하게 되므로 노이즈의 영향을 줄일 수 있다. 필터링 효과는 창의 크기에 영향을 받는다.

3.2 용접선의 인식

전처리 과정에 의해서 슬릿광의 추출이 되면 이 정보를 이용하여 용접선의 위치를 추출하여야 한다. 본 연구에서는 직선 필터 용접 전용이므로 일정한 각도 이상의 두 직선의 교점을 용접선으로 판단 하였다. 직선 성분을 추출하기 위한 기존의 직선 탐색 마스크 (mask) 를 이용한 방법들은 영상 전체에 걸쳐서 반복된 계산을 수행하므로 계산 시간이 길어진다¹⁰⁾. 본 연구에서는 직선 성분을 찾는 방법으로 Δ rm 방법을 이용하였다 (Fig. 4). Δ rm 방법은 전처리 과정으로부터 추출된 화소에 대하여 팔 (Δ rm) 을 적용하여 (Fig. 4a) 계산된 양쪽 팔 사이의 각도, θ_a 가 기준각도 이상이 되면 모서리 (corner) 로 판단 한다 (Fig. 4b, 4c). 팔 사이의 각도는 두 벡터 \vec{L}_1, \vec{L}_2 의 내적을 이용하여 다음과 같이 표시된다.

$$\cos\theta_a = \frac{\vec{L}_1 \cdot \vec{L}_2}{\|\vec{L}_1\| \times \|\vec{L}_2\|} \quad (13)$$

이때, 팔의 길이가 길면 노이즈에 강한 반면, 위치 결정 정확도 (localization) 가 떨어지게 되고, 팔의 길이가 짧으면 위치 결정 정확도가 높아지는 대신 노이즈에 취약해 지므로 화상의 S/N비를 고려하여 결정해야 한다. 이 방법의 문제점은 Fig. 4에서와 같이 전처리 과정에서 추출된 화소들이 슬릿광의 중심점뿐만 아니라 반사광이나 스패터등으로

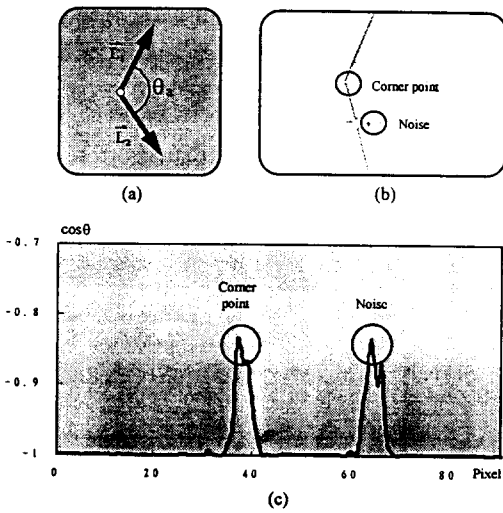


Fig. 4 Extracting corner point using arm method
 (a) applying arm to pre-processed pixels (b) fillet joint and noise in raw image (c) noise problem occur with arm method

인하여 노이즈가 발생하면 이 점이 모서리점으로 판단할 수 있다.

이와 같은 노이즈의 영향을 줄이기 위하여 Arm 방법을 변형하여 모서리를 찾는 대신 직선 부분을 추출하였다. 노이즈가 포함된 가상의 화상과 화상 처리 과정을 Fig. 5에 나타내었다. 세부적인 사항은 다음과 같다.

(1) 전처리 과정을 통하여 레이저 슬릿을 찾는다 (Fig. 5a, 5b).

(2) Arm 방법을 이용하여 직선 영역, 즉 $\cos\theta$ 의 값이 -1 부근인 값을 유효한 범위로 하여 직선 부분만 추출하여, 모서리 부근과 노이즈 영역을 제거한다 (Fig. 5c).

(3) 이 직선 구간 내의 화소들을 최소 자승 오차법으로 직선 맞춤 (least square line fitting) 한다 (Fig. 5d).

(4) 연속된 직선 조각 (line segment) 들이 동일한 직선으로 판단되면 두 구간내의 화소들을 합쳐서 하나의 직선으로 다시 직선 맞춤을 한다 (Fig. 5e).

(5) 두 직선의 교점을 계산하여 이 모서리점을 용접선으로 추출 한다.

이와 같은 방법으로 용접선을 추출하면 서브픽셀 (sub-pixel) 단위의 정밀도로 위치를 계산할 수 있다.

4. 용접 판넬의 위치 및 용접 경로 추정

4.1 시작점/끝점의 추출

용접선의 방향과 위치를 결정하기 위하여 용접선의 시작점 및 끝점을 인식해야 한다. 그러나 시작점/끝점에서 시각 센서로 획득한 화상은 용접물

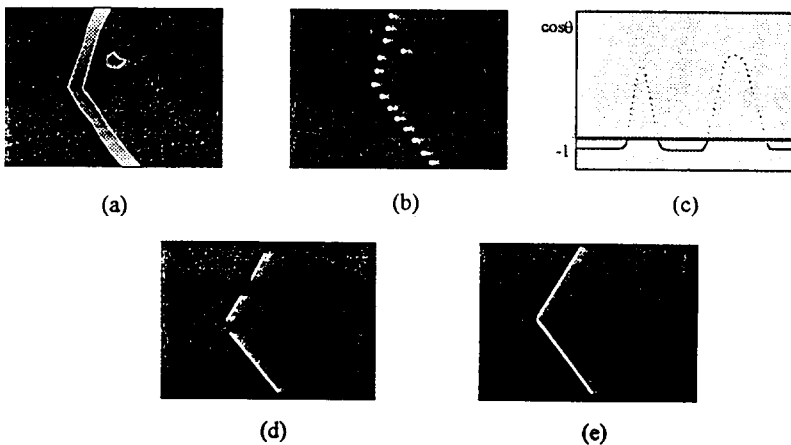


Fig. 5 Procedure to extract weld seam
 (a) raw image (b) searching laser stripe (c) applying arm method (d) find line segment (e) line fitting

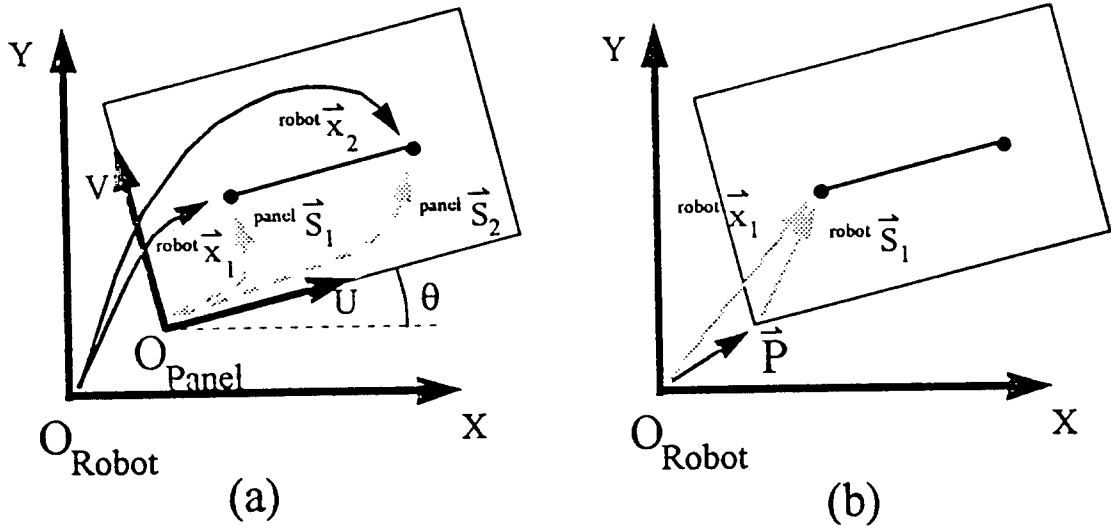


Fig. 6 Transformation between robot and panel coordinates (a) rotation about Z axis (b) translation of panel

의 회전, 기울어짐 등에 의해서 다양성을 보이므로, 직접 화상처리를 하기에는 어려움이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 다음과 같이 수행하였다. 로봇의 초기 위치는 용접선의 끝점으로 추정되는 위치로부터 약 50mm 이내에 존재한다고 가정하여 용접물이 CAD 정보와 다른 위치에 존재하여도 용접선을 찾을 수 있도록 설정하였다. 용접선이 발견되면 센서를 용접선으로 근접시킨 후, 용접선의 시작점/끝점 방향으로 10mm씩 진전하며 용접선을 추적하였다. 이 과정에서 용접선으로 인식된 최종 화상의 정보 (직선의 갯수, 기울기, 교점의 위치) 와 새로 획득한 화상의 정보를 매번 비교하여 급격한 변화가 나타나는 곳을 용접선의 시작점/끝점으로 인식하였다. 이와 같이 고속으로 시작점/끝점의 대략적인 위치를 찾은 후, 이진 탐색 (binary search) 기법을 이용하여 위치 오차가 0.2mm 이하가 되도록 시작점/끝점의 위치를 측정하였다.

4.2 용접 판넬의 위치 보정

소조립 공정의 대상물은 대형 구조물이므로 용접물의 설치시 위치 및 회전 오차가 발생한다. CAD 자료의 기준 좌표계와 실제 구조물의 좌표계를 보정하기 위하여 특정 용접선의 시작점과 끝

점을 비교하여 좌표계 사이의 변환 관계를 구하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 측정된 용접선의 시작점과 끝점 및 용접선의 방향을 이용하여 CAD 자료의 좌표계를 실제 구조물의 좌표계에 일치하도록 변환하였다.

Fig. 6a에 나타난 바와 같이, 용접 로봇의 좌표계와 판넬의 좌표계는 XYZ와 UVW이며, 판넬 좌표계로부터 용접선 까지의 위치 정보, $panel \vec{S}_i$ 는 CAD 자료에서 주어지며 로봇 좌표계로부터 용접선 까지의 위치, $robot \vec{X}_i$ 는 용접선의 시작점과 끝점을 측정하여 알고 있다. 센서로 측정한 용접선의 위치는 예상되는 위치와 다르게 존재할 수 있으므로 로봇 좌표계와 용접 판넬 좌표계 사이의 보정을 위하여 4×4 변환 행렬, $robot T_{panel}$ 을 구해야 하며, 이 관계는 다음과 같다¹¹⁾.

$$robot \vec{X}_i = robot T_{panel} panel \vec{S}_i \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

위의 식에서 변환 행렬의 미지수는 직교-단위 (orthonormal) 조건을 이용하면 7개이다. 하나의

용접선의 시작점/끝점으로 부터 6개의 방정식을 구할 수 있으나 변환 행렬을 직접 구할 수 없으므로 회전 행렬과 이동 행렬을 분리하여 결정하였다.

소조립용 판넬은 대형 구조물이므로 판넬은 XY 평면에서 Z축을 중심으로 회전 한다. 이와 같은 제한 조건을 이용하면 용접 판넬 좌표계와 로봇 좌표계 사이의 회전 변환 행렬, ${}^{robot}R_{panel}$, 은 다음과 같다.

$${}^{robot}R_{panel} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

이 회전 변환을 적용하기 위한 용접선의 벡터는 끝점과 시작점의 벡터차이며 다음과 같다.

$$\begin{aligned} {}^{robot}\vec{X} &= {}^{robot}\vec{x}_2 - {}^{robot}\vec{x}_1 \\ {}^{panel}\vec{S} &= {}^{panel}\vec{s}_2 - {}^{panel}\vec{s}_1 \end{aligned} \quad (17)$$

식 (16) 과 식 (17) 을 다음식에 적용 하여 θ 를 계산함으로써 회전 변환 행렬을 구할 수 있다.

$${}^{robot}\vec{X} = {}^{robot}R_{panel} {}^{panel}\vec{S} \quad (18)$$

용접 판넬의 이동 행렬, \vec{P} , 은 다음과 같이 계산할 수 있다 (Fig. 6b).

$$\vec{P} = {}^{robot}x_i - {}^{robot}\vec{s}_i \quad (19)$$

이때, $\vec{P} = [p_x p_y p_z]^T$, ${}^{robot}\vec{s}_i = {}^{robot}R_{panel} {}^{panel}\vec{s}_i$

로봇 좌표계와 용접 판넬 좌표계 사이의 변환 행렬은 다음과 같다.

$${}^{robot}T_{panel} = \begin{bmatrix} {}^{robot}R_{panel} & \vec{P} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

이와 같은 방법으로 좌표 변환 행렬을 계산하면 식 (15) 의 관계를 판넬상의 다른 용접선에 적용하여 보정된 위치를 계산할 수 있으며, 보정된 용접선의 위치를 이용하여 다른 용접선의 시작점/끝점의 위치를 빠른 속도로 탐색할 수 있다.

4.3 용접 경로 추정

소조립 공정의 용접은 다수의 직선 용접선으로 구성되며 다수의 용접선을 용접하는 데 최소의 시간이 소요 되도록 CAD 자료를 바탕으로 최적의 용접 경로를 구하는 과정이 수행되어야 한다. 이 문제는 TSP (Traveling Salesman Problem) 경우와 유사하며, 최적 경로 결정 (optimal path planning) 문제를 해결하기 위해 다양한 알고리즘이 제시되고 있다⁷⁾. 최적 경로 문제의 해는 모든 경우의 경로를 고려하여 최소의 비용 (cost) 이 드는 경로로 결정할 수 있지만 이러한 방법은 계산 시간이 증가하여 본 연구의 목적인 실시간 경로 추정이 어렵다.

본 연구에서는 합리적인 경로를 추정하기 위하여 휴리스틱 (heuristic) 알고리즘의 일종인 동적

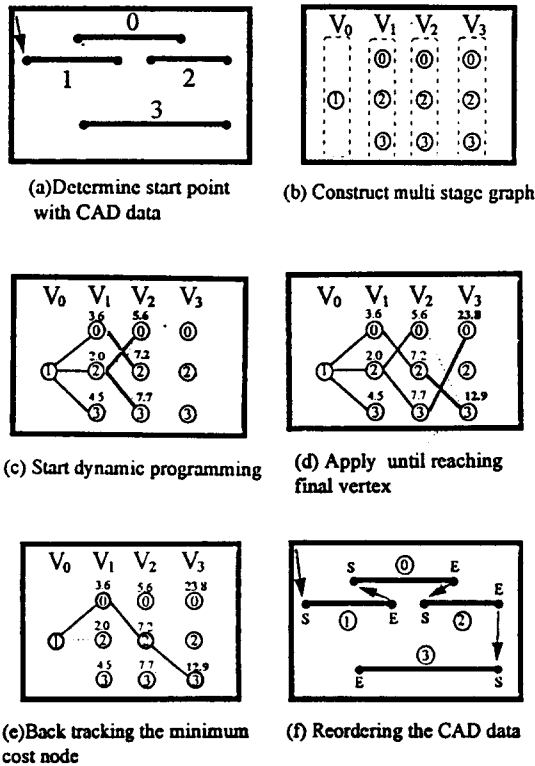


Fig. 7 Searching optimal weld path using dynamic programming

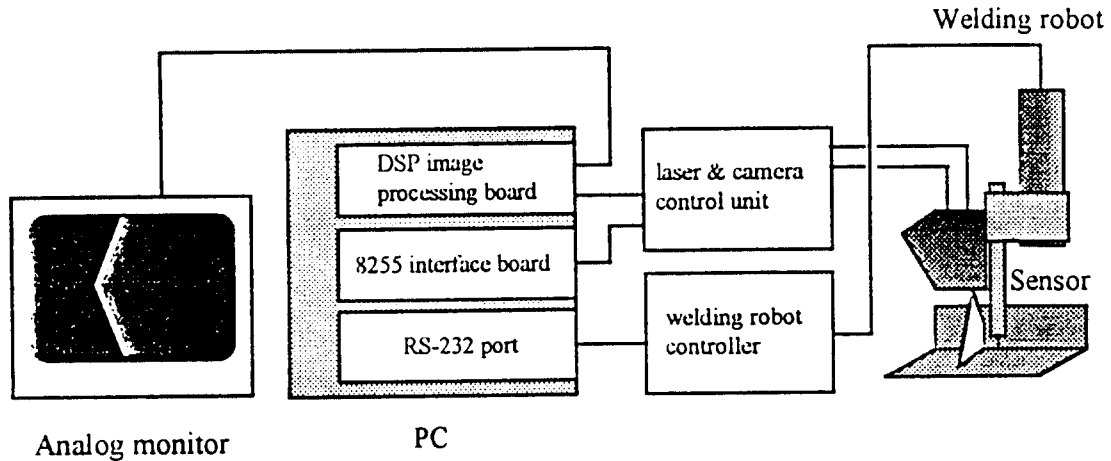


Fig. 8 Schematics of experimental system

프로그래밍 방법을 적용하였다. 이 방법은 경로의 결정시 최적 경로의 가능성이 적은 경우는 초기에 제외시켜 경우의 수를 줄이고 최소 비용이 드는 경로를 찾는 방법으로, 문제에 대한 해가 연속적인 판단의 결과로부터 결정된다. 이 방법은 최적의 해를 구하지는 못하지만, 계산 시간이 적게 소요되어 실시간에 합리적인 용접 경로의 계산이 가능하다.

적용한 동적 프로그램은 다음과 같이 설명할 수 있다. 각각의 용접선은 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 노드 (node) 로 표시되며, 정점 (vertex) 이라 하는 노드 들의 집합이 열을 구성하는 다단계 그래프 (multi stage graph) 로 나타낸다. 시작점은 로봇의 원점을 고려하여 결정한 후, 선분 (edge) 으로 정점간의 노드들을 다음의 관계식을 이용하여 연결해 나간다.

$$(21)$$

윗 식에서 $COST(i)(j)$ 를 출발점 으로부터 V_i 정점의 j 노드 까지의 최소 비용이고, $c(k)(j)$ 는 $i-1$ 정점의 k 노드와 i 정점의 j 노드간의 비용이면, 후진 접근 방법 (backward approach) 으로 $COST(i)(j)$ 를 최소화 하는 $i-1$ 정점의 노드와 i 정점의 j 노드를 연결하는 선분을 결정해 나갈 수 있다. 이와 같은 방법으로 최종 정점까지 수행한 후, 최종 정

점의 최소 비용 노드로 부터 시작점까지 역 추적 (back tracking) 함으로써 최소 비용의 용접 경로를 추정한다.

동적 프로그래밍 방법이 효과적으로 수행되기 위하여 비용 함수가 문제의 목적에 적합 하도록 정의되어야 한다. 본 연구 에서는 용접용 로봇의 이동 시간을 줄이는 방향으로 비용 함수를 정의 하였다. 즉, 로봇의 직선 이동 시간과 로봇의 회전 시간, 경로상의 장애물 회피 시간을 고려하여 각각의 가중치를 부여하여 합산하였다.

5. 실험

본 연구에서 설계 제작된 시각 센서의 측정 정밀도를 평가하기 위하여 카메라 보정시 사용된 보정 모듈을 이용하여 보정판을 이동시키며 영상을 획득한 후 보정판에 있는 스트링의 3차원상의 좌표값을 측정하여 위치를 비교하였다 (Fig. 3).

시각 센서의 정밀도에 대한 검증한 후, 자동 교시 시스템의 성능을 시험하였다. 전체 시스템의 구성과 흐름도는 Fig. 8과 Fig. 9에 도시 하였다. 사용한 컴퓨터는 PC486 이며, DSP 흑백 화상 처리 보드에서 $640(H) \times 480(V)$ 으로 영상을 디지털화하여 화상 처리하였다. 상용의 3축 직교 좌표형 로봇을 이용하여 로봇의 팔 끝에 부착된 센서와 토치

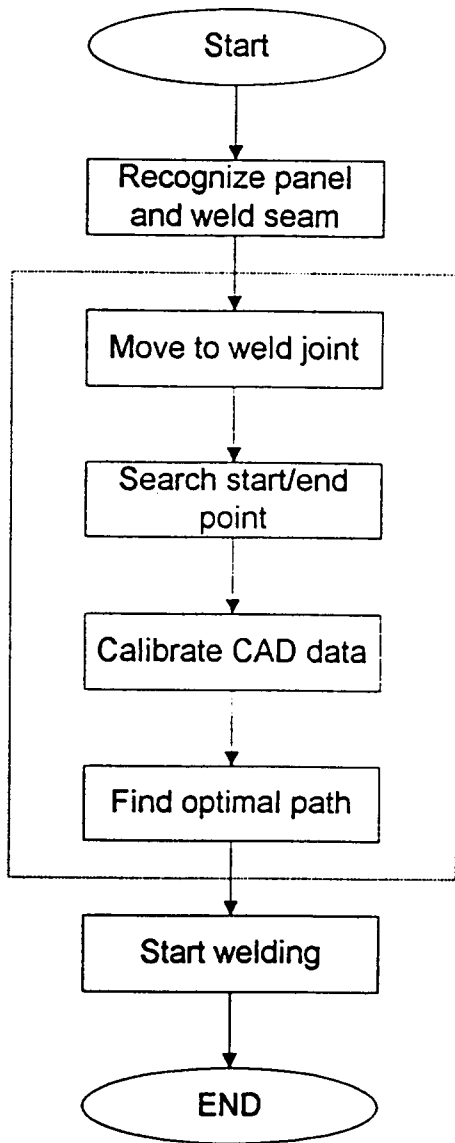


Fig. 9 Flow chart of automatic teaching system

를 구동하였다. 컴퓨터는 로봇 컨트롤러와 RS-232로 연결하여 로봇의 위치 및 동작을 제어하였다. 영상에서 슬릿광의 추출은 5행 간격으로 하고 창 크기는 10픽셀로 하였고, 용접선을 찾기 위한 팔의 길이는 25픽셀로 설정하였다.

필렛 형태의 용접물에 대해서 센서를 적용하여 임의로 다른 위치에 회전과 이동을 시킨 용접 판넬 위에 존재하는 용접선의 시작점/끝점을 검출하였

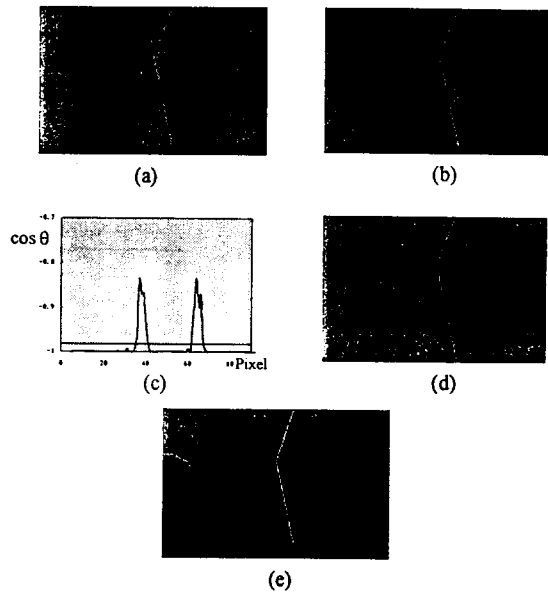


Fig. 10 Implementation of extracting weld seam using arm method

- (a) captured image (b) searching laser strip
- (c) applying arm method (d) finding line segment
- (e) extractint weld seam

다. 두 점의 위치를 이용하여 로봇 좌표계와 용접 판넬 좌표계 사이의 변환 행렬, ${}^{robot}T_{panel}$, 의 계산을 수행 하였다. 최적 경로를 계산하는 과정은 CAD 자료를 이용하여 시뮬레이션한 결과로 확인 하였다.

6. 결과 및 고찰

제작된 센서의 사양으로 무게는 500g이며, 크기는 100(W)×86(L)×41(H) mm이다. 센서의 정밀도 검증 실험의 결과, 절대 거리 오차는 0.4mm 이내 이고 상대 거리 오차는 0.1mm 이내이며, 평균 절대 거리 오차는 측면 방향으로 0.05mm, 깊이 방향으로 0.18mm이고, 평균 상대 거리 오차는 0.03mm 이다. 이 결과로부터, 제안된 카메라 보정 방법이 효율적으로 수행 되었으며 센서의 사양을 만족시키는 것을 확인할 수 있다.

실제 영상 처리 과정을 Fig.10에 나타내었으며 이 영상 처리 과정에서 소요된 시간은 약 100ms로

써 용접선의 시작점/끝점 위치 결정의 실시간 구현할 수 있었다. 필렛 용접 외에도 직선으로 이루어진 용접 조인트인 맞대기, 랩 (lap), V groove등의 조인트에 Arm 방법을 적용한 경우에도 용접선 인식이 가능하였다. 실시간 용접선 추적용 센서로 적용 가능성을 실험한 결과 용접선을 강건하게 인식하였다.

용접 판넬을 회전하고 이동시킨 상태에서 센서로 용접선의 시작점/끝점의 위치 및 방향을 검출하고 로봇 좌표계와 용접 판넬간의 변환 행렬을 구하여 용접 판넬의 위치를 보정할 수 있었다. 동적 프로그래밍 알고리즘에 의한 최적 용접 경로 추정을 여러 경우에 대하여 시험한 결과 비교적 합리적인 경로 결정을 실시간에 수행할 수 있었다. 실제로 이 방법을 적용하기 위해서는 비용 함수의 구성 요소들에 대한 가중치를 합리적으로 부여하는 과정이 선행되어야 한다.

현재 개발된 자동 교시 시스템은 기능면에서 다음의 사항을 보완하여야 한다. 시각 센서의 크기를 축소시키는 것이 요구되며, 화상 처리 및 좌표 변환 알고리즘을 실시간 용접 작업중 3차원 곡선의 용접선에 적용할 수 있도록 보완하는 것이 필요하다. 또한, 로봇과 용접물의 충돌을 회피하기 위한 알고리즘과 용접 조건에 관한 정보를 추가하는 과정이 요구된다. 일반적인 OLP 시스템과 비교하여 시뮬레이션이 가능하도록 그래픽 기능과 사용자와의 인터페이스 부분을 보완하여야 한다.

7. 결 론

본 연구에서는 용접 경로 자동 교시 시스템을 구현하기 위한 기본적인 요소를 개발하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 자동 교시용 시각 센서를 설계 및 제작하였고, 보정 장치를 이용하여 정확하고 효율적인 보정 작업을 수행하였다.

2. Arm 방법을 이용하여 노이즈에 강건하고 실시간 구현에 적합한 직선 필렛 용접 전용 화상 처리 알고리즘을 개발하였다.

3. 이진 탐색 방법으로 용접선의 시작점/끝점의 위치와 용접선의 방향을 정확하게 추출하였고, CAD 정보를 이용하여 용접 판넬의 좌표축 변환 행

렬을 구하였다.

4. 동적 프로그래밍 기법을 적용하여 합리적인 로봇의 용접 경로를 결정하였다.

참 고 문 헌

1. Sugitani, Y., Kanjo, Y. and Murayama, M. CAD/CAM Welding Robot System in Steel Bridge Fabrication, Quaterly Journal of Japan Welding Society, Vol. 13, No. 1, pp. 28-23, 1995
2. Lane, J. D. Robotic Welding, IFS Ltd, 1987, UK
3. Nomura, H., Middle, J. E. and Masumoto, I. Sensors and Control Systems in Arc Welding, Champman & Hall, 1994, London
4. Agapakis, J. E. Approaches for Recognition and Interpretation of Workpiece Surface Features Using Structured Lighting, The International Journal of Robotics Research, Vol. 9, No. 5, 1990
5. Indyk, D., Velastin, S. A. Survey of Range Vision Systems, Mechatronics, Vol. 4, No. 4, pp. 417-449, 1994
6. Li, X., Hall, N. S. Corner Detection and Shape Classification of On-line Handprinted Kanji Strokes, Pattern Recognition, Vol. 26, No. 9, pp. 1315-1334, 1993
7. Horowitz, E., Sahni, S. Fundamentals of Computer Algorithms, Computer Science Press, 1989, Maryland
8. Lee, C. W. A Study on the Vision Sensor for Automatic Welding of Linear Weldments with Height Variation, M. S. thesis, KAIST, 1994
9. Ballard, D. H. Computer Vision, Prentice Hall, 1985, New Jersey
10. Gonzales, R. C., Wintz, P. Digital Image Processing, Addison Wesley, 1987, New York
11. Fu, K. S., Gonzalez, R. C. and Lee, C. S. G. Robotics - Control, Sensing, and Intelligence, McGraw-Hill, 1987, New York