

레이저 용접 로봇의 경로 생성에 관한 연구

강희신, 서 정, 박경택

한국기계연구원 나노융합·생산시스템연구본부

Study on Path Generation for Laser Welding Robot

Hee-Shin Kang, Jeong Suh and Kyoung-Taik Park

Nano Convergence & Manufacturing Systems Research Division, Korea Institute of Machinery & Materials

Abstract

Robot path generation and laser welding technology for manufacturing automotive body are studied. Laser welding and industrial robot systems are used with the robot based laser welding system. The laser system used in this study is 1.6kW Fiber laser, while the robot system is 6 axes Industrial robot (payload:130kg). The robot based laser welding system is equipped with laser scanner system for remote laser welding. The laser source, robot and laser scanner system are used to increase the processing speed and to improve the process efficiency. The welding joints of steel plate are butt and lapped joints. The quality test of the laser welding are through the observation the shape of bead on plate and cross-section of welding part. The 3 dimensional laser welding for non-linear pipe welding line is performed. This paper introduces the robot based laser welding system to resolve the limited welding speed and accuracy of the conventional spot welding system.

Keywords: robot, path, generation, laser, welding

1. 서 론

자동차의 경량화, 안전도 향상, 생산성 향상을 달성하기 위하여 차체 레이저 용접기술이 자동차업계의 핵심기술로 대두되고 있다. 선진국에서는 기존 저항 점용접의 차체 조립공정을 레이저 용접으로 대체하여 차체 경량화 및 생산성 향상을 달성하고 있고, 국내 자동차 업계에서도 고출력 Nd:YAG 레이저와 6축 로봇을 접목한 레이저 용접 생산기술을 개발 및 적용하고자 많은 노력을 기울이고 있다.^{1,2} 자동차 차체 용접을 위해 사용되고 있는 저항 점용접 공법은 저항 점용접기의 기하학적 구조와 용접 특성으로 인해 적용범위가 한정적이고 용접효율이 낮아서 자동차 설계 및 생산방식의 발전에 장애 요인이 되어 새로운 용접 및 접합공법을 적용하려는 시도가 국내외의 자동차업계에서 이루어지고 있다.^{3,5}

본 연구에서는 자동차 제조용 지능로봇 시스템에서 가장 필요로 하는 핵심기술인 자동차 차체 레이저 용접기술과 더불어 차체 레이저 용접 로봇 적용을 위해 중요한 기술인 로봇 경로(path) 생성

(generation) 기술, CAD/CAM 인터페이싱 기술에 관하여 연구를 수행하였다. 산업현장에서 로봇을 이용하여 자동 공정을 실현할 때 일반적으로 계획된 로봇 경로를 미리 작업자가 로봇에게 교시(teaching)하여 일련의 작업이 진행 된다. 용접하고자 하는 대상의 용접경로가 단순할 경우에는 앞서 언급한 교시 작업이 쉽지만 복잡한 용접 경로를 갖는 대상물의 경우에는 많은 시간과 시행착오가 필요하다. 특히, 항상 수직으로 빔이 조사되어야 하는 레이저 용접의 특성 상 비선형 형태의 용접물의 경우에는 작업자가 용접면에 수직이 되도록 로봇을 교시하는 작업이 대단히 어려운 작업이 된다. 이러한 문제점을 설계 시 만들어지는 CAD 데이터를 활용하여 CAD/CAM 인터페이싱 기술과 레이저 용접 기술을 이용하여 해결하고자 하였다. 차체의 CAD 데이터로부터 CAD/CAM 인터페이싱 기술을 이용하여 3차원 데이터를 추출하고 로봇 경로(path)를 생성하는 일련의 공정과 방법에 대하여 연구를 하였다. 로봇을 이용한 레이저 용접 시스템의 용접속도를 향상시키기 위해 많은 연구

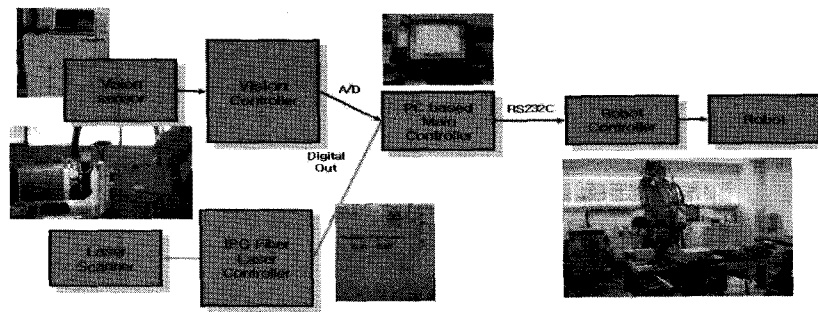


Fig. 1 Control scheme of robot based remote laser welding system.

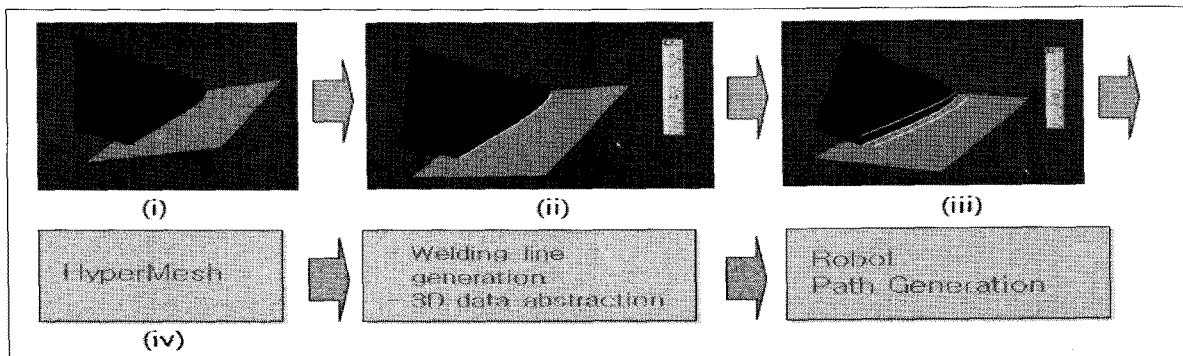


Fig. 2 Abstraction process of 3 dimensional data.

가 수행되어져 왔다.⁶ 본 연구에서는 로봇이 용접 점 사이를 이동 시 기존 저항 용접 시스템 보다 용접속도를 향상시킬 수 있는 용접 공정으로 로봇 기반 원격 레이저 용접 시스템을 구축하고, CAD/CAM 인터페이스 기술을 이용하여 기초적인 용접 실험을 수행하였다.

2. 실험 방법

레이저 발전기는 1.6kW급 파이버 레이저 시스템이며, 로봇은 130kg급 가반 중량의 6축 산업용 로봇을 활용하였다. 레이저 및 로봇과의 인터페이스를 토대로 3차원 레이저 용접 시스템을 구축하고, 시제품 제작용 용접지그를 설계 제작하여 레이저 용접 시스템에 대한 기초 성능시험 및 평가를 실시하였다. Fig. 1은 본 연구를 위해 구성된 로봇 기반 원격 레이저 용접 로봇 시스템과 제어 구성을 보여준다. PC 기반의 총괄 제어기를 구성하여 레이저와 로봇 제어를 관장한다. 차체 부품 용접을 위한 3차원 레이저 용접시스템은 레이저 시스템과 산업용 로봇을 이용하여 구성될 수 있다. 레이저 발전기로부터 나온 레이저 빔은 광파이버를 통해 로봇 암(arm)의 끝단에 부착된 용접헤드까지 전송되고 로봇의 각 축을 움직임으로서 3차원 용접을 수행하게

된다. 시스템을 구성하는 핵심장치는 레이저 발전 장치, 레이저 광학계, 광학계 이송을 위한 산업용 6축 로봇, 용접시편을 고정하기 위한 지그 및 고정 장치, 레이저 광 정밀 조사를 위한 레이저 거리 센서, 레이저 용접 품질 측정을 위한 품질 모니터링 장치, 전체 시스템 제어를 총괄하는 PC 기반 제어기 등으로 구성된다. 광학계는 2축 레이저 스캐너와 초점장치로 구분된다. 초점 거리를 일정하게 유지하기 위해 F-theta 렌즈를 사용하였다. 제어기 간 통신 방식은 RS232C 방식을 사용하였다.

2.1 용접 부품의 3차원 형상 데이터 추출

현재 로봇 및 수치제어 동작기계 분야에서 로봇이나 NC 동작기계는 주어진 용접, 도장 및 가공 작업을 하기 위해서는 주어진 작업 종류에 따라 여러 가지 용접 동작을 하여야 하는 데, 여기에 필요한 정확한 작업 동작을 작업자에 의해 만들어져야 한다. 현재 일반적으로 작업자가 가장 많이 사용하는 방법은 공작물과 공구 사이의 기하학적 관계를 직접 만들어 주는 방법 즉, 티칭(teaching) 펜던트(pendant)를 이용하여 작업경로를 생성하는 것이다. 이 방법은 작업자에게 많은 작업 시간을 요구할 뿐만 아니라 정확한 작업경로를 생성하기가 어렵기 때문에 제품의 품질이나 생산성이 저하되고 있다. 더욱이 작업경로가 3

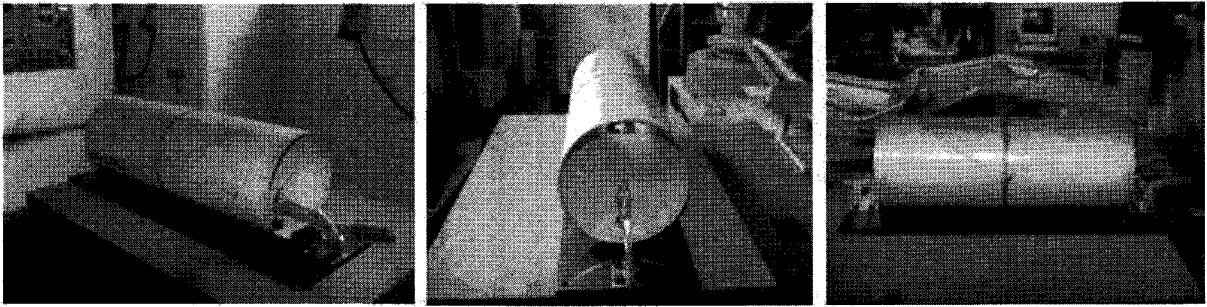


Fig. 3 Pipe specimens for 3 dimensional data.

차원일 경우 로봇의 작업경로의 궤적 및 공구자세를 생성하기가 어렵기 때문에 티칭 방식의 하나인 시행착오(try and error) 방식을 많이 이용한다. 이러한 시행착오 방식에는 많은 예러 요소가 포함 될 뿐만 아니라 특히 정밀 작업에 요구되는 경우 정확한 공구자세를 생성하기가 어렵다. 최근 NC 공작기계나 로봇 시스템 분야에서 OLP(off line program)를 이용하여 작업경로를 생성하는 방법을 도입하여 활용되고 있지만, 대부분의 경우가 2차원 작업 경로에 적용되고 있으며, 특히 3차원 로봇 작업동작에 대한 경로 생성에 관한 연구는 이루어지고 있으나 현장에 적용되는 사례는 그리 많지 않다. 이러한 어려움을 개선하기 위하여 CAD/CAM 인터페이스 기술을 이용하여 차체의 CAD 데이터로부터 3차원 데이터를 추출하여 로봇 경로(path)를 생성하고자 하였다.

Fig. 2는 용접부품의 3차원 형상 데이터를 추출하는 과정을 보여주고 있으며, 그 과정은 다음과 같다.

- (i) CATIA V5 사용하여 용접 부품을 모델링
- (ii) 두개의 Surface가 교차하는 형상의 모델 생성 - 용접선
- (iii) 용접선에 대한 평행선 생성
- (iv) Hyper-Mesh를 이용 3개의 평행선에 대한 3차원 형상 데이터 추출

실제 용접 부품은 복잡한 형상을 하고 있을 뿐만 아니라 부품들 사이 서로 접하는 형태가 매우 복잡하고, 서로 접합되는 부분 중에서 특정한 부위를 용접하여야 한다. 그러므로 다양한 가화학적 형상을 갖는 용접선은 여러 가지 용접조건 및 작업조건 등을 고려하여 결정되고, 이 용접선의 기하학적 형상에 대한 3차원 좌표계 정보를 얻어야 한다. 일부 CAD 프로그램에서는 용접선을 지정하여 주면, 이 용접선에 대한 3차원 좌표 정보를 직접 얻을 수 있지만, 대부분의 프로그램은 Hyper-Mesh와 같은

보조 프로그램을 활용하여 3차원 정보를 추출하여야 한다. 이렇게 하여 얻은 3차원 좌표 정보를 3차원 그래프로 표시할 수 있으며, 이를 로봇좌표계로 변환하여 로봇 작업경로 생성을 위한 OLP의 기본 데이터로 사용할 수 있다. 본 연구는 경로 생성의 알고리즘 개발 단계이므로 비교적 형상이 단순하고 모델링 및 제작이 비교적 쉬운 파이프 형상의 부품을 선택하였다. 그래서 용접작업 경로생성에 대한 실험을 위해 용접 부품 샘플을 Fig. 3과 같이 제작하였다. 일반적으로 기계 부품이나 자동차 부품은 용접 작업을 요구하는 용접선의 형태가 매우 복잡한 경우가 많다. 비선형 3차원 용접선은 원형 파이프 상에 구현되어질 수 있다.

2.2 3차원 형상 로봇 경로 생성

실제 CAD 좌표계와 설치된 용접 부품의 좌표계 사이에 약간의 오차가 있으나 여기서는 수학적 유도 과정을 간략화 하기 위해 동일하게 본다. 일반적으로 CAD 도면에 따라 제작된 용접 부품을 작업대에 고정하고, 용접 작업을 시작하게 된다. 용접 부품에 생성된 용접 경로의 3차원 CAD 좌표계 데이터와 이에 인접한 3차원 곡선에 대한 3차원 CAD 좌표계 데이터는 로봇 좌표계로 모두 좌표계 변환이 이루어져야 한다. 이것은 로봇이 로봇 좌표계로 변환된 좌표계 데이터에 의해 작업경로를 따라 동작을 하기 때문이다.

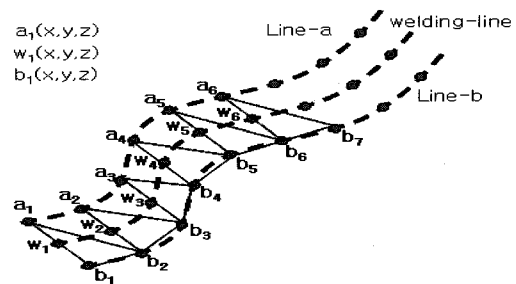


Fig. 4 Welding line and parallel lines.

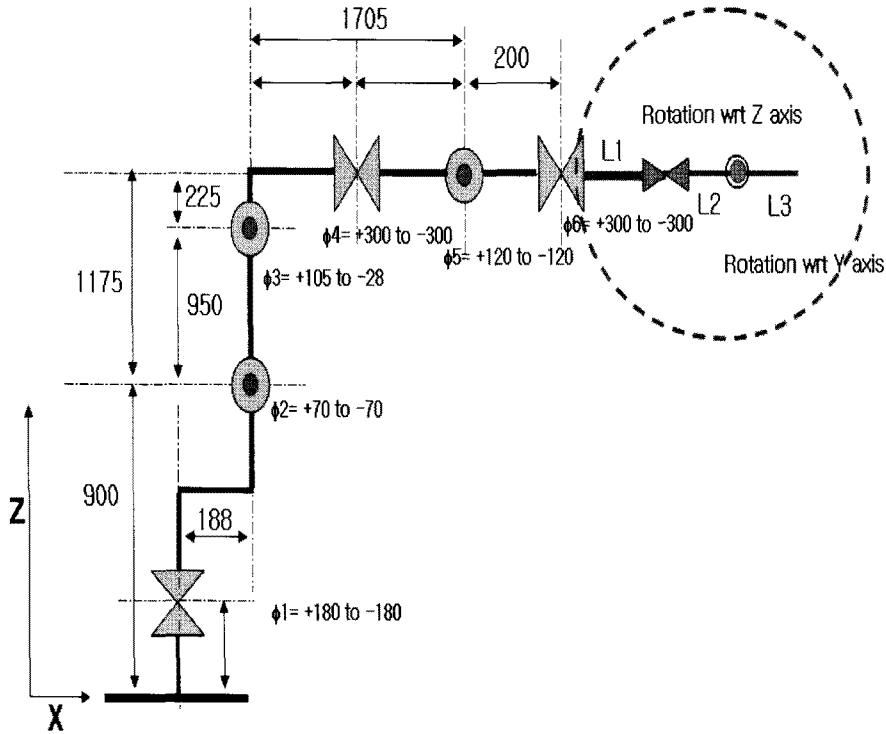


Fig. 5 Geometrical relations of robot system and additional axes.

CAD 좌표계와 로봇좌표계 사이의 관계를 알기 위해 Fig. 4와 같이 용접선과 인접한 평행선에 대한 좌표계를 정의한다. CAD 좌표계에서 Line A 상의 점들을 $(a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, \dots)$ 라 하고, Line B 상에 대한 점들의 좌표를 $(b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, \dots)$ 라고 할 때, CAD 좌표계(workpiece)에서 로봇 좌표계로의 좌표계 변환은 각 축에 대한 회전(rotation)과 각 축에 대한 평행 이동(translation)으로 이루어진다.

① Z 축에 대한 회전

$$\begin{bmatrix} \cos(\theta_z) & -\sin(\theta_z) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_z) & \cos(\theta_z) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

② Y 축에 대한 회전

$$\begin{bmatrix} \cos(\theta_y) & 0 & \sin(\theta_y) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta_y) & 0 & \cos(\theta_y) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

③ X 축에 대한 회전

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_x) & -\sin(\theta_x) & 0 \\ 0 & \sin(\theta_x) & \cos(\theta_x) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

④ CAD 좌표계와 로봇 좌표계 사이의 변환 (translation)

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & 0 & t_y \\ 0 & 0 & 1 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

상기 식들을 이용하여 CAD 좌표계의 점 (p_x, p_y, p_z) 와 로봇 좌표계 사이의 변환 관계식을 이용하면, 변환된 좌표 (t_{px}, t_{py}, t_{pz}) 는 다음과 같은 결과식을 얻을 수 있다.

$$t_{px} = ((t_y + p_y)\sin(\theta_x) + (t_z + p_z)\cos(\theta_x))\sin(\theta_y) + (t_x + p_x)\cos(\theta_y)\cos(\theta_z) - ((t_y + p_y)\cos(\theta_x) - (t_z + p_z)\sin(\theta_x))\sin(\theta_z) \quad (2.5)$$

$$t_{py} = ((t_y + p_y)\sin(\theta_x) + (t_z + p_z)\cos(\theta_x))\sin(\theta_y) + (t_x + p_x)\cos(\theta_y)\sin(\theta_z) + ((t_y + p_y)\cos(\theta_x) - (t_z + p_z)\sin(\theta_x))\cos(\theta_z) \quad (2.6)$$

$$t_{pz} = ((t_y + p_y)\sin(\theta_x) + (t_z + p_z)\cos(\theta_x))\cos(\theta_y) - (t_x + p_x)\sin(\theta_y) \quad (2.7)$$

로봇좌표계에서 선 a상의 점들의 좌표를 $(a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, \dots)$ 라 하고, 로봇좌표계에서 선 b상의 점들의 좌표를 $(b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, \dots)$ 라고 할 때, 이러한 점들의 집합 중에서 세 개의 점들을 선택하면, 이 세 개의 점들은 하나의 평면을 구성하게 된다. 이 점들의 집합을 $(a_1, b_1, b_2), (a_2, a_3, b_3)$ 등과

같은 순서로 선택 할 때, 이 점들이 이루는 평면의 방정식은 $Ax + By + Cz + D = 0$ 이다. 이러한 평면에 대한 방정식의 계수는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} A &= (y_1z_2 + y_2z_3 + z_1y_3) - (y_3z_2 + y_1z_3 + y_2z_1) \\ B &= -(x_1z_2 + x_2z_3 + x_3z_1) + (x_3z_2 + x_1z_3 + x_2z_1) \\ C &= (x_1y_2 + x_2y_3 + x_3y_1) - (x_3y_2 + x_2y_1 + x_1y_3) \\ D &= -(x_1y_2z_3 + x_2y_3z_1 + x_3y_1z_2) + (x_3y_2z_1 + x_2y_1z_3 + x_1y_3z_2) \end{aligned} \quad (2.8)$$

상기의 선택된 세 개의 점에 의해 형성된 평면 방정식을 $A(i)x + B(i)y + C(i)z + D(i) = 0$ 이라고 할 때, 평면에 수직인 단위 벡터는 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다. 이것은 작업을 위한 작업 공구 자세를 나타낸다.

$$n = \frac{A(i)i + B(i)j + C(i)k}{\sqrt{A(i)^2 + B(i)^2 + C(i)^2}} \quad (2.9)$$

평면에 수직인 단위 벡터의 각 축에 대한 각 축의 계수는 다음과 같다.

$$k_x(i) = \frac{A(i)}{\sqrt{A(i)^2 + B(i)^2 + C(i)^2}} \quad (2.10)$$

$$k_y(i) = \frac{B(i)}{\sqrt{A(i)^2 + B(i)^2 + C(i)^2}} \quad (2.11)$$

$$k_z(i) = \frac{C(i)}{\sqrt{A(i)^2 + B(i)^2 + C(i)^2}} \quad (2.12)$$

상기 식들의 단위 벡터는 경로 계산과 공구자세를 결정하는 데 사용된다. Fig. 5는 로봇 시스템과 부가축에 관한 기하학적 정보를 보여 준다.

본 연구에서는 로봇과 용접 부품 사이의 위치 관계를 가능한 단순화하기 위해 로봇과 용접 부품 사이에서 회전과 평행 이동이 없는 것으로 하여 로봇의 경로, 즉 로봇 끝단(end-effector)의 동작 궤적을 계산하였다. 이러한 결과값을 그래프로 표현한 것이 Fig. 6과 같다. 실제 로봇 시스템에 적용할 경우 정확한 작업경로를 얻기 위해 Fig. 5와 같이 로봇과 용접 부품 사이의 정확한 기하학적 관계를 찾을 필요가 있다.

또한, 공구가 갖는 부가 축에 대한 기하학적 제한 사항을 고려하여야 한다. CAD 모델을 기반으로 한 용접 로봇 경로 생성 소프트웨어에 의해 계산된 로봇 경로는 도면상의 원점을 기준으로 계산된 값이다. 이 계산된 로봇 경로를 실제 적용하기 위해서는 로봇의 기준좌표와 물체가 놓인 위치좌표를 실측하여 도면상의 원점과의 오차를 보정해 주어야 한다.

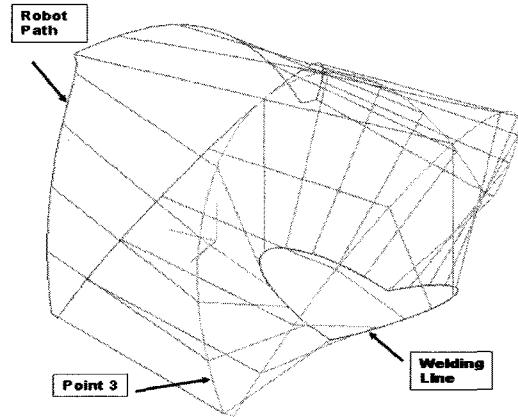


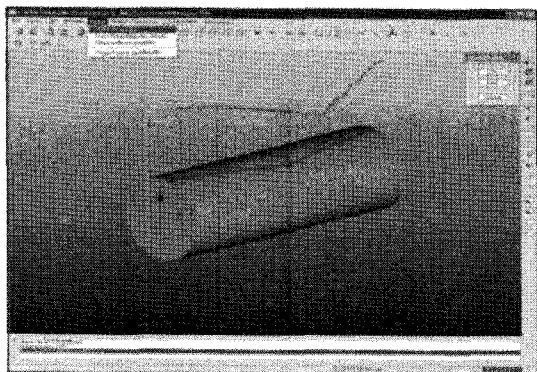
Fig. 6 Robot path generation of pipe specimen.

3. 실험 결과

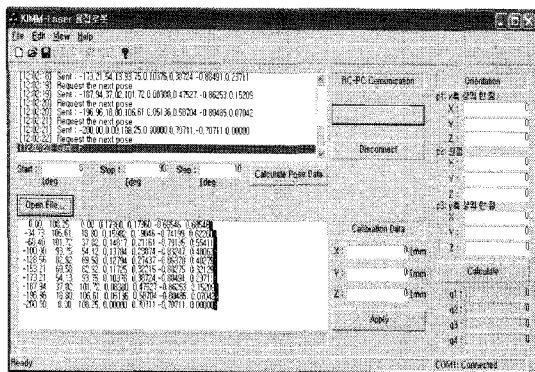
레이저 시스템과 로봇 제어기 간의 인터페이스를 토대로 3차원 레이저 용접 시스템을 구축하고, 레이저 용접 시스템의 기초 성능시험 및 평가를 수행하였다. 일련의 과정을 통해 생성된 로봇 경로를 로봇제어기에 전송하여 로봇이 파이프 상의 3차원 용접선 경로를 따라 용접을 수행하였다. 용접 로봇 경로 생성 소프트웨어에 의해 계산된 로봇 경로는 도면상의 원점을 기준으로 계산된 값이다. 즉 이 계산된 로봇 경로를 실제 사용하기 위해서는 로봇의 기준좌표와 물체가 놓인 위치를 보정해 주어야 한다.

Fig. 7(a)는 CAD 프로그램과 Hyper-Mesh 보조 프로그램을 이용하여 파이프 시편의 용접선에 대해 추출한 3차원 형상의 좌표계 데이터를 보여주고 있다. 이러한 3차원 형상정보의 좌표계 데이터는 로봇의 작업경로의 궤적 생성에 기본 데이터로 활용된다. 이러한 작업대 상의 용접물과 로봇 사이의 정렬 상태에 대한 정확한 기하학적 관계가 로봇의 작업경로 생성에 있어서 중요한 역할을 한다. Fig. 7(b)는 생성된 로봇 경로(robot path) 데이터를 로봇에 전송하는 PC 제어 프로그램이다. Fig. 8은

생성된 로봇 경로 데이터가 로봇에 전송되면서 레이저 용접이 진행되는 실험장면을 보여준다. 생성된 로봇 경로에 의해 로봇이 용접선을 잘 추종하여 본 알고리즘을 검증할 수 있었다. PC 제어 프로그램을 이용하여 생성된 로봇 경로 데이터를 로봇에 전송하였고 파이프 시편에 레이저 용접 실험을 수행하였다. 실험결과 분석을 통해 초기 용접 시작점에서 용접 끝점으로 로봇이 이동하면서 위치 오차가 누적되어 용접 끝점에서는 위치 오차가 발생하였으나, 경로의 보정 작업을 통해 누적오차를 제거하였다. 또한, 정밀한 용접선 추적을 위해 용접선 추적 장치를 이용할 경우 로봇 경로 생성 과정에서 발생하는 위치오차를 실시간으로 제거할 수 있다. 용접선 경로 상의 급격한 변곡점에서는 로봇의 갑작스런 방향 변화가 발생하여 용접속도가 불균일해지는 현상을 관찰할 수 있었으며, 이와 같은 용접점에서는 로봇의 자세에 특별한 주의를 기울여야 한다는 결론을 얻을 수 있었다. 로봇이 도면상의 용접선을 잘 추종하였고 본 알고리즘의 성능을 검증할 수 있었다.



(a)



(b)

Fig. 7 Windows of PC controller; (a) abstraction of 3 dimensional data by using Hyper-Mesh (b) generation of robot path and configuration.

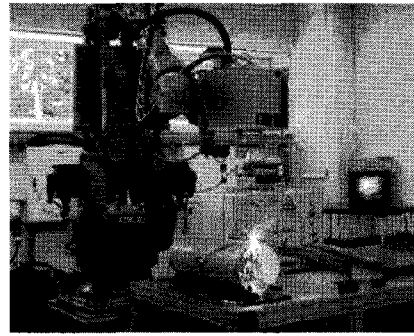


Fig. 8 The results of laser welding test by using robot path.

4. 결론

차체의 레이저 용접 시 로봇 경로 생성을 위하여 작업자가 티칭 팬던트를 이용하여 작업경로를 생성하는 시행착오 방식의 문제점을 개선하고자 CAD 데이터를 이용한 레이저 용접 로봇의 경로 생성에 관하여 연구를 하였다. CAD/CAM 인터페이스 기술을 이용하여 3차원 데이터를 추출하여 로봇 경로를 생성하였다. 레이저 시스템과 로봇 제어기의 인터페이싱을 토대로 3차원 레이저 용접 시스템을 구축하여 레이저 용접 시스템에 대한 성능시험 및 평가를 실시하였다. 용접 경로 생성에 대한 실험 및 결과 검증이 용이한 파이프 형상의 용접 부품 상에 용접경로를 형성하였다.

CAD 프로그램과 Hyper-Mesh 프로그램을 이용하여 파이프 시편 상의 용접선에 대해 3차원 형상의 좌표계 데이터를 추출하였다. 이러한 3차원 형상정보를 갖는 좌표계 데이터는 로봇의 작업경로의 궤적 생성에 기본 데이터로 활용된다. 로봇의 자세를 결정하기 위해서는 위치와 방향 정보가 모두 필요하다. 추출한 좌표계 데이터로부터 로봇의 위치 정보를 생성하기 위해 용접선상의 임의점을 생성할 수 있었다. 실험결과 분석을 통해 초기 용접 시작점에서 용접 끝점으로 로봇이 이동하면서 위치 오차가 누적되어 용접 끝점에서는 위치 오차가 발생하였으나, 경로의 보정 작업을 통해 누적오차를 제거하였다. 용접선 경

로 상의 급격한 변곡점에서는 로봇의 갑작스런 방향 변환이 발생하여 용접속도가 불균일해지는 현상을 관찰할 수 있었으며, 이와 같은 용접점에서는 로봇의 자세에 특별한 주의를 기울여야 한다는 결론을 얻을 수 있었다.

CAD 좌표계와 공작물 좌표계를 동일하게 가정한 후 기하학적 관계식의 유도 과정을 간략하게 하였다. 이로 인해 실제 실험에서는 오차가 발생하였고 작업대 상의 용접물과 로봇 사이의 정렬 상태에 대한 정확한 기하학적 관계가 로봇의 작업경로 생성에 있어서 중요한 역할을 한다는 것을 확인할 수 있었다. 로봇이 도면상의 용접선을 잘 추종하였고 본 알고리즘의 성능을 검증할 수 있었다.

YAG welding on non-linear trajectories with 3D camera seam tracker following for automotive applications," Laser Appls. Auto Industry, Section F-ICALEO, pp. 21, 2000.

후 기

본 연구는 지식경제부의 부품소재개발사업의 지원을 받아 수행되었고 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Coste F. et al, "A Rapid Seam Tracking Device for YAG and CO₂ High Speed Laser Welding," Proc. ICALEO 85, pp. 217-223, 1998.
- 2) Eimermann T., "Hem Flange Laser Welding," 25th ISATA Symposium, No. 921089, Florence Italy, June 1992.
- 3) Beyer E., Klotzbach A., Fleischer V. and Morgenthal L., "Nd:YAG - Remote Welding with Robots," Proceedings of Lasers in Manufacturing, pp. 367-373, 2003.
- 4) Klotzbach A., Fleischer V., Morgenthal L. and Beyer E., "Sensor guided remote welding system for YAG-laser applications," Proceedings of Lasers in Manufacturing, pp. 17-19, 2005.
- 5) Graaf M. W. de, Aarts R. G. K. M., Meijer J., Jonker J. B., "Robot-sensor synchronization for real-time seam-tracking in robotic laser welding," Proc. 23rd Int. Cong. On Applications of lasers and Electro-Optics, pp. 1301, 2004.
- 6) Aubry P., Coste F., Fabbro R., Frechett D., "2D