

아크센서를 적용한 격자형 용접용 모빌 로봇의 제어

전양배* · 한영대** · 김상봉*

Motion Control of Mobile Robot with Arc Sensor for Lattice Type Welding

Yang Bae Jeon*, Young Dae Han**, and Sang Bong Kim*

Key Words : Mobile Robot(모빌로봇), Arc Sensor(아크센서), Decoupling Method(디커플링 방법).

Abstract

This paper presents the motion control of a mobile robot with arc sensor for lattice type welding. Its dynamic equation and motion control method for welding speed and seam tracking are described. The motion control is realized in the view of keeping constant welding speed and precise target line even though the robot is driven along a straight line or corner. The mobile robot is modeled based on Lagrange equation under nonholonomic constraints and the model is represented in state space form. The motion control of the mobile robot is separated into three driving motions of straight locomotion, turning locomotion and torch slider controls. For the torch slider control, the proportional integral derivative (PID) control method is used. For the straight locomotion, a concept of decoupling method between input and output is adopted and for the turning locomotion, the turning speed is controlled according to the angular velocity value at each point of the corner with range of 90° constrained to the welding speed. The experiment has been done to verify the effectiveness of the proposed controllers. These results are shown to fit well by the simulation results.

기호설명

1. 서론

- X, Y : world coordinate system
- x, y : coordinate system fixed on the mobile robot
- P_o : geometric center with coordinates (x_o, y_o)
- P_c : mass center of the robot with coordinates (x_c, y_c)
- b : distance between driving wheel and P_o
- d : distance from P_o to P_c
- r_w : radius of driving wheel
- r_p : radius of pinion
- m_c : mass of the mobile robot excluding for the driving wheels and the rotors of the DC motors
- m_w : mass of driving wheel including rotor of motor
- I_c : inertia moment of mobile robot excluding driving wheels and rotors of motor
- I_w : inertia moment of wheel and motor rotor on driving wheel axis
- I_m : inertia moment of wheel and motor rotor on wheel diameter
- x_s : distance of the seam tracking sensor
- x_n : distance of the torch slider
- x_{ts} : distance of the torch end
- l_s : maximum distance of the seam tracking sensor
- l_{ts} : maximum distance of the torch slider

조선 산업 분야에서 배선장은 배의 강도를 높이기 위해 여러 개의 에그 박스(egg box) 형태로 구성되어 있다. 에그 박스는 수평, 수직, 격자 형태(Lattice type)의 용접 공정으로 이루어진다. 오늘날 이 부분에서의 용접 자동화를 위해 직선형 주행 용접 로봇을 사용하고 있지만^[1], 코너 부분의 용접 공정이 매우 복잡하기 때문에 인력에 의존하고 있다. 따라서, 격자 형태의 용접공정을 완성시키기 위해서는 곡각부의 인력에 의한 용접으로 인해 많은 인력과 시간이 소요되고 있는 실정이다. 격자 형태의 용접에 있어, 6자유도를 가지는 매니플레이터 형태의 용접 로봇의 도입으로 용접 자동화를 실현할 수 있으나 여러 가지 문제점을 피할 수 없게 된다. 우선 용접 장소가 매우 협소하기 때문에 격자형 라인 용접에는 부적절하며, 용접 시작 위치를 찾는 데 많은 시간이 소요되며, 이동성, 소형화, 비용 등 많은 문제가 있다. 따라서, 격자형 라인과 같은 열악한 용접 환경에서 용접 자동화를 실현하기 위해 소형, 저중량의 용접 로봇이 필요로 하고 있다.

이동 로봇의 주행 제어에 있어 시스템 모델링은 매우 중요하다. 논홀로노믹(nonholonomic)한 구속조건에서 모빌 로봇의 일반적이고 유익한 모델링은 G. Campion^[7], [12] 등에 의해 체계화 되었다. 또한, 모빌 로봇 위에 매니플레이터를 부착한 시스템에 관한 연구도 많이 이루어졌다. Yamamoto^{[10],[11]} 등은 매니플레이터의 위치와 힘을 제어하기 위해 비선형적인 이동 로봇의 동역학에 대해 임출력 선형화(linearization)를 통한 Nonlinear 제어를 연구하였고, Chung^[4] 등은 모델링 오차 등을 없애기 위해 다이나믹 모델링을 기반으로 한 로버스트 제어 및 적응제어를 적용시킨 연구도 이루어졌다. 그리고, Tsuchiya^[6]와 Fierro^[8] 등은 Lyapunov 이론을 기반으로 한 제어기의 안정성 해석을 통한 Backstepping 기법을 이용하여 모빌 로봇의

* 부경대학교 기계공학과

** 한돌엔지니어링

E-mail: neomicro@dreamwiz.com

TEL: +82-51-620-1606, FAX: +82-51-621-1411

운동에 관한 연구가 수행되었다. 모빌 매니플레이터에 대한 대부분의 제어 알고리즘은 모빌 로봇의 위치 제어, 매니플레이터의 위치 및 힘 제어에 초점을 이루어져 있어, 매니플레이터 끝 점의 속도 제어에 대해서는 취약한 실정이다. 하지만, 용접을 목적으로 하는 모빌 로봇의 경우, 첫째, 직선 라인 또는 커브 라인을 따라 주행하더라도 용접 속도를 일정하게 유지하거나 제한된 속도 범위 내로 유지하는 관점에서 제어가 이루어져야 된다. 둘째, 토치의 위치를 제어하는 슬라이더의 길이가 제한되어 있기 때문에 모빌 로봇의 위치를 용접 라인에 점근적으로 수렴할 수 있도록 제어되어야 한다. 마지막으로, 토치 슬라이더는 용접 팁의 끝이 용접 라인에 항상 유지될 수 있도록 제어해야 되는 문제점이 있다.

본 연구에서는 위와 같은 문제점을 해결하기 위해서는 논홀로노믹 구속 조건 하에서 라그랑저(Lagrange) 방정식을 기반으로 하여 모빌 로봇을 모델링 한 후 상태방정식으로 표현 하였다. 그리고, 직선 주행, 턴 주행, 용접 라인 추적 제어에 대하여 제어알고리즘을 제시하였고, 실험을 통해서 제안된 제어 알고리즘들의 성능을 확인하였다.

2. 모빌 로봇의 구성

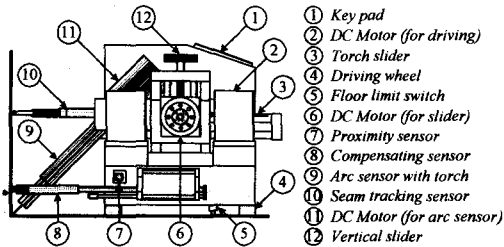


Fig. 1 Configuration of mobile robot

격자형 용접을 위해 개발된 용접 주행 로봇의 구성은 Fig. 1에 나타내었다. 용접 주행로봇의 전체적인 구성은 제어부, 구동부, 로봇 본체부, 아크 센서부로 구성된다.

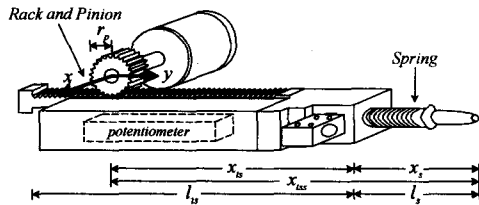


Fig. 2 Configuration of torch slider

제어부는 DC 모터 드라이버를 포함한 마이크로 프로세서 (intel 80c196kc)와 제안된 제어 알고리즘을 실행하기 위한 DSP (tms320c32)로 구성된다. 구동부는 로봇이 직선 주행 및 선회할 수 있도록 좌우에 하나의 주행용 바퀴가 있으며, 로봇의 평형을 위한 보조 바퀴는 상하로 설치하였다. 로봇 본체부는 경량화를 도모하기 위해 알루미늄으로 제작하였으며, 주행시 무거운 용접 케이블을 견인하면서 주행하기 위해 본체 중앙에 전자석을 설치하여 자중보다 더 큰 견인력을 가지고 주행하도록 설계하였다. 아크 센서부는 토치의 위치를 제어하기 위한 용접 라인 추적 센서와 토치 슬라이더 그리고, 고속회전 하면서 용접을 행하면서 용접 전류를 생성하는 아크 센서로 구성되며, Fig. 2에 나타내었다. 용접 팁은 위빙 효과를 위해 편심되도록 설계하였다.

3. 모빌 로봇의 모델링

3.1 동력학적 구속 조건

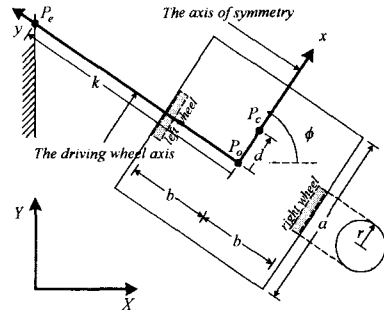


Fig. 3 Geometrical motion of mobile robot

이 장에서는 Fig. 3에 나타낸 것처럼 로봇의 기하학적 운동에 대한 구속 방정식과 운동 방정식을 구한다. 우선, 매니플레이터를 제외하고 모빌 로봇에 대한 것만 고려하자. 만약 로봇의 보조 바퀴에 대한 모든 조건을 무시한다면, 모빌 로봇은 다음의 5가지의 변수로 모든 기하학적 좌표를 표현할 수 있다.

$$q = [x_c, y_c, \phi, \theta_r, \theta_l]^T \quad (1)$$

여기서, ϕ 는 모빌 로봇의 헤딩 각이고, θ_r, θ_l 은 각 좌우 주행용 바퀴의 각이다. 모빌 로봇은 두개의 바퀴로 구동하므로 다음과 같은 가정을 할 수 있다. 바퀴와 바닥과의 접촉점에서 직각방향의 속도 성분은 0(zero)이다. 그리고, 바퀴와 바닥과의 접촉점에서의 속도 성분은 0(zero)이다. 위 두 가정으로부터 다음의 구속 행렬을 구할 수 있다.

$$A(q)\dot{q} = 0 \quad (2)$$

where

$$A(q) = \begin{bmatrix} -\sin \phi & \cos \phi & -d & 0 & 0 \\ -\cos \phi & -\sin \phi & -b & r_w & 0 \\ -\cos \phi & -\sin \phi & b & 0 & r_w \end{bmatrix}$$

3.2 모빌 로봇의 운동 방정식

모빌 로봇은 2차원 평면상에서만 운동하므로 위치 에너지는 0(zero)이다 ($V=0$). 그리고, 마찰에너지를 무시 ($F=0$) 한다면 라그랑저 방정식을 적용한 모빌 로봇의 운동에너지는 다음과 같다^[2].

$$m\ddot{x}_c + m_w d(\ddot{\phi} \sin \phi + \dot{\phi}^2 \cos \phi) = \lambda_1 \sin \phi + (\lambda_2 + \lambda_3) \cos \phi \quad (3)$$

$$m\ddot{y}_c - m_w d(\ddot{\phi} \cos \phi - \dot{\phi}^2 \sin \phi) = \lambda_1 \cos \phi + (\lambda_2 + \lambda_3) \sin \phi \quad (4)$$

$$m_w d(\ddot{x}_c \sin \phi - \ddot{y}_c \cos \phi) + I\ddot{\phi} = d\lambda_1 - b(\lambda_2 - \lambda_3) \quad (5)$$

$$I_w \ddot{\theta}_r = \tau_r - \lambda_2 r_w \quad (6)$$

$$I_w \ddot{\theta}_l = \tau_l - \lambda_3 r_w \quad (7)$$

여기서, $m = m_c + 2m_w$, $I = I_c + 2m_w(b^2 + d^2) + 2I_m$ 이다. 그리고, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 는 3개의 기하학적 구속 조건에 상응하는 Lagrange multipliers이다. τ_r, τ_l 는 각 좌우 바퀴에 작용하는 토크이다. 여기서 구한 식들을 행렬형태로 나타내 보면 다음과 같다.

$$M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q}) = E(q)\tau_p - A^T(q)\lambda \quad (8)$$

여기서,

$$M(q) = \begin{bmatrix} m & 0 & m_w d \sin \phi & 0 & 0 \\ 0 & m & -m_w d \cos \phi & 0 & 0 \\ m_w d \sin \phi & -m_w d \cos \phi & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_w & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_w \end{bmatrix}$$

$$V(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} m_w d \dot{\phi}^2 \cos \phi \\ m_w d \dot{\phi}^2 \sin \phi \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, E(q) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \tau_p = \begin{bmatrix} \tau_r \\ \tau_l \end{bmatrix}$$

3.3 상태 방정식 표현

위에서 구한 식에 Lagrange multipliers를 소거하기 위하여 $A(q)$ 의 null space인 $S(q)$ 를 다음과 같이 정의하자.

$$S(q) = [s_1(q), s_2(q)]$$

$$= \begin{bmatrix} c(b \cos \phi - d \sin \phi) & c(b \cos \phi + d \sin \phi) \\ c(b \sin \phi + d \cos \phi) & c(b \sin \phi - d \cos \phi) \\ c & -c \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, c = \frac{r_w}{2b} \quad (9)$$

구속 방정식 (2)가 0(zero)이므로 \dot{q} 가 $A(q)$ 의 null space임을 알 수 있다. 따라서, $\dot{q} \in \text{span}\{s_1(q), s_2(q)\}$ 이므로 \dot{q} 를 $\dot{q} = s_1(q)\eta_1 + s_2(q)\eta_2 = S(q)\eta$ 로 $\dot{q} = S(q)\eta + \dot{S}(q)\eta$ 와 같이 표현이 가능하다. 여기서 η 를 구해보면, $\eta = \dot{\theta} = [\dot{\theta}_r, \dot{\theta}_l]^T$ 이 된다. 따라서 $S^T(q)$ 를 식(8)의 양변에 곱하고, $S^T(q)A^T(q) = 0$ 와 $S^T(q)E(q) = I_{2 \times 2}$ 의 성질을 이용하면 다음과 같이 전개된다.

$$S^T(q)M(q)(S(q)\dot{\eta} + \dot{S}(q)\eta) + S^T(q)V(q, \dot{q}) = \tau_p \quad (10)$$

상태 변수를 $x = [x_c, y_c, \phi, \theta_r, \theta_l, \dot{\theta}_r, \dot{\theta}_l, x_{ts}, \dot{x}_{ts}, x_s, v_{weld}]^T$ 로 정의하면, 모빌 로봇의 dynamics는 다음과 같이 상태방정식으로 구해진다.

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} S\eta \\ -(S^T MS)^{-1}(S^T M \dot{S}\eta + S^T V) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ (S^T MS)^{-1} \end{bmatrix} \tau_p \quad (11)$$

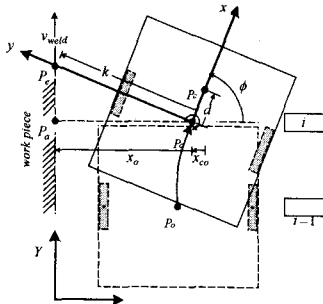


Fig. 4 Motion of the mobile robot

Fig. 4를 참고하면, 로봇이 (i-1)번째의 위치에서 (i)번째로 이동할 때, 용접 속도는 다음과 같이 주어진다.

$$v_{weld} = \dot{x}_{ts} \cos \phi - x_{ts} \dot{\phi} \sin \phi + v_c \sin \phi = v(q) \quad (12)$$

여기서, v_{weld} 는 용접 속도이고, v_c 는 로봇의 전방향 속도이다. Fig. 2에서, 토치 슬라이더에 뉴턴의 제2법칙을 적용하면 다음과 같은 식을 구할 수 있다.

$$J \frac{d^2 \theta_{sm}}{dt^2} + D \frac{d\theta_{sm}}{dt} = \tau_s \quad (13)$$

식(13)의 양변에 Pinion의 반지름을 곱하고, $\dot{x}_{ts} = r_p \frac{d\theta_{sm}}{dt}$,

$\ddot{x}_{ts} = r_p \frac{d^2 \theta_{sm}}{dt^2}$ 의 성질을 이용하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\ddot{x}_{ts} = -D_m \dot{x}_{ts} + C_m \tau_s, D_m = \frac{D}{J}, C_m = \frac{r_p}{J} \quad (14)$$

여기서, J 는 모터의 관성모멘트이고, D 는 점성마찰계수이다. θ_{sm} 는 모터 샤프트의 각도이고, τ_s 는 토치 슬라이더에 작용하는 토크이다. 또한, Fig. 2에 나타난 용접선 추적 센서의 길이, x_s 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$x_s = \begin{cases} \frac{x_o}{\sin \phi} - x_{ts} = l(x) & : 0 \leq x_s \leq l_s \\ l_s & : x_s > l_s \end{cases} \quad (15)$$

식(11)에 다음의 상태변수 ($x_{ts}, \dot{x}_{ts}, x_s, v_{weld}$)를 추가하면, 모빌 로봇에 대한 모든 상태 방정식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} S\eta \\ -(S^T MS)^{-1}(S^T M \dot{S}\eta + S^T V) \\ \dot{x}_{ts} \\ -D_m \dot{x}_{ts} \\ l(x) \\ \dot{v}(q) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ (S^T MS)^{-1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & C_m \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \tau \quad (16)$$

여기서,

$$x = [x_c, y_c, \phi, \theta_r, \theta_l, \dot{\theta}_r, \dot{\theta}_l, x_{ts}, \dot{x}_{ts}, x_s, v_{weld}]^T$$

$$\tau = [\tau_r, \tau_l, \tau_s]^T$$

모터 토크 입력의 수와 모빌 로봇의 자유도의 수가 동일하기 때문에 다음과 같이 nonlinear feedback을 모빌 로봇에 적용 가능하다.

$$\tau_p = (S^T M \dot{S}\eta + S^T V) + (S^T MS)^{-1} S^T E u_p, \tau_s = u, \quad (17)$$

이때, 제어 입력을 $u = [u_p, u_s]^T$ 로 정의하면 상태방정식은 다음과 같이 간단히 표현 가능하다. 여기서, u_p 는 모빌 로봇을 위한 제어 입력이고, u_s 는 토치 슬라이더를 위한 제어 입력이다.

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (18)$$

여기서,

$$f(x) = \begin{bmatrix} s(q)\eta \\ 0 \\ x_{ts} \\ -D_m \dot{x}_{ts} \\ l(x) \\ \dot{v}(q) \end{bmatrix}, g(x) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ I_{2 \times 2} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & C_m \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

4. 제어 알고리즘

4.1 토치 슬라이더 제어

용접시 아크 센서로부터 용접 팁의 상하 용접 전류를 센싱하여 Average Filter 및 Exponential Filter를 적용한 후 용접 전류에 따른 토치 슬라이더의 위치를 환산한다^[1]. 토치 슬라이더를 제어하기 위한 출력방정식은 다음과 같다.

$$y_s = h_s(x) = x_s \quad (19)$$

용접 라인의 위치 에러를 $e_s = x_s^d - x_s$ 로 정의하면, 토치 슬라이더를 위한 제어 입력은 다음과 같이 각 계인과 함께 PID제어기를 이용하여 구하였다.

$$u_s = K_p e_s + K_i \int e_s dt + K_d \dot{e}_s \quad (20)$$

4.2 직선 주행 제어

직선 주행에 있어서 용접 속도를 제어하기 위해 모빌 로봇의 위치와 속도를 제어하였다. 로봇의 위치와 속도를 제어하기 위한 출력 방정식은 다음과 같다.

$$y_p = h_p(x) = [h_{p1}(q) \ h_{p2}(\eta)]^T = [y_{p1} \ y_{p2}]^T \quad (21)$$

여기서, $h_{p1}(q)$ 는 모빌 로봇의 무게 중심점 P_c 에서 설계된 경로까지의 가장 짧은 거리이고, $h_{p2}(\eta)$ 는 모빌 로봇의 전방향 속도 이다. 직선 라인을 고려하기 위해 경로를 $Px + Qy + R = 0$ 와 같이 놓으면, 가장 짧은 거리와 모빌 로봇의 전방향 속도는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$h_{p1}(q) = h_{p1}(x_c, y_c) = \frac{Px_c + Qy_c + R}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (22)$$

$$h_{p2}(\eta) = \dot{x}_c \cos \phi + \dot{y}_c \sin \phi = \frac{r_w}{2} (\eta_1 + \eta_2) \quad (23)$$

위 두 출력 방정식에 대한 decoupling 행렬은 다음과 같다^[5,9].

$$\ddot{y}_{p1} = \frac{\partial J_{h_{p1}}(q)S(q)}{\partial q} \ddot{\eta} + J_{h_{p1}}(q)S(q)u_p \quad (24)$$

$$\dot{y}_{p2} = \frac{\partial h_{p2}}{\partial q} \dot{x} = J_{h_{p2}}(q)u_p \quad (25)$$

여기서,

$$J_{h_{p1}}(q) = \frac{\partial h_{p1}}{\partial q} = \frac{1}{\sqrt{P^2 + Q^2}} [P \ Q \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$J_{h_{p2}}(q) = \frac{\partial h_{p2}}{\partial q} = \begin{bmatrix} \frac{r_w}{2} & \frac{r_w}{2} \end{bmatrix}$$

따라서, 전체 decoupling 행렬은

$$\Phi = \begin{bmatrix} J_{h_{p1}}(q)S(q) \\ J_{h_{p2}}(q) \end{bmatrix} \quad (26)$$

이다. 만약 Φ 이 모든 x 에 대하여 역행렬이 존재하고, 모빌 로봇의 위치와 속도에 대한 에러를 각각 e_p, e_v 로 정의하면,

직선 주행 제어를 위한 제어 입력은 다음과 같다.

$$u_p = \Phi^{-1}(y_p - \dot{\Phi}\eta) \quad (27)$$

여기서,

$$y_p = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{p_p} e_p + K_{D_p} \dot{e}_p \\ e_v \end{bmatrix}$$

4.3 선회 제어

선회시, 로봇의 두 바퀴의 방향은 서로 반대이고, 완전히 동일한 속도로 제어되어 회전한다. 따라서, 모빌 로봇의 전방향 속도는 0(zero)으로 가정할 수 있다. 그러므로, 선회시 용접 속도는 직선 주행시 용접 속도에서 전방향 속도를 제외한 방정식임을 알 수 있다. 식(12)와 위의 가정을 이용하면 선회시 용접 속도와 로봇의 각속도와의 관계 방정식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{\phi} = -\frac{\sin \phi^2 v_{weld}}{x_o} \quad (28)$$

선회시 용접 속도를 제어하기 위한 출력 방정식을 선택하면,

$$y_p = h_p(x) = \dot{\phi} \quad (29)$$

이다. 각속도에 대한 에러를 $e_o = -\frac{\sin \phi^2 v_{weld}}{x_o} - \dot{\phi}$ 로 정의하면, 각 계인과 함께 제어입력은 다음과 같다.

$$u_p = (K_{p_o} e_o + K_{D_o} \dot{e}_o) \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (30)$$

5. 시뮬레이션 및 실험 결과

시뮬레이션은 직선 및 직각 라인을 고려하였고, 노이즈와 외란이 시스템에는 영향을 주지않는다고 가정하였다. 개발된 시스템에 대한 파라미터 값들은 Table 1에 나타내었다.

고품질의 용접 비드를 얻기 위해서 전문가들이 용접 속도를 7.5mm/s 로 유지하므로, 실험 및 시뮬레이션에 용접 속도를 위와 같이 선택하였다. 로봇의 초기 파라미터 값들은 Table 2에 나타내었다.

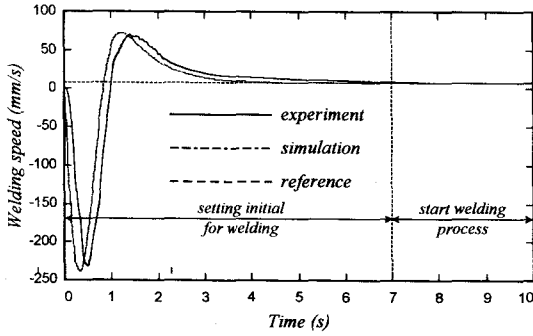
Table 1 Numerical values of mobile robot

Parameters	Values	Units	Parameters	Values	Units
b	0.1045	m	m_c	16.9	Kg
a	0.105	m	m_w	0.3	Kg
d	0.01	m	I_c	0.2801	kg m ²
r_w	0.025	m	I_w	3.75e-4	kg m ²
r_p	0.02	m	I_m	4.96e-4	kg m ²
I_u	0.3	m	J	100	Nm/s ²
I_s	0.1	m	D	0.01	

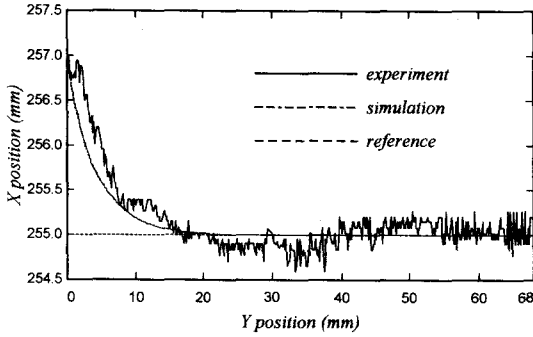
Table 2 Condition values of mobile robot

Condition	Straight locomotion	Turning locomotion
Initial (x_c, y_c)	$(x_c, y_c) = (257mm, 0mm)$	$(x_c, y_c) = (255mm, 0mm)$
Initial v_c	$v_c = 0mm/s$	$v_c = 0mm/s$

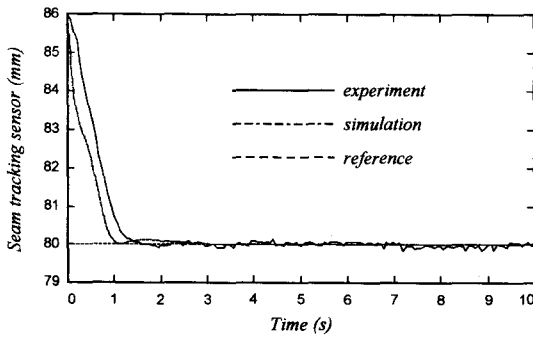
Initial ϕ	$\phi = 80^\circ$	$\phi = 80^\circ$
Initial x_b	$x_b = 175\text{mm}$	$x_b = 175\text{mm}$
Initial x_s	$x_s = 85.964\text{mm}$	$x_s = 80\text{mm}$
Output equation	$h_1(x) = x_s$ $h_{p1}(q) = (x_c - 255)$, $h_{p2}(\eta) = \frac{r_w}{2}(\eta_1 + \eta_2)$	$h_1(x) = x$, $h_p(x) = \dot{\phi}$
Reference input	$x_s^d = 80$, $v_1^d = 0$, $v_2^d = 7.5$	$x_s^d = 80$, $\dot{\phi}^d = -\frac{7.5 \sin \phi^2}{255}$
Gain for the robot	$K_{P_p} = 2.5, K_{D_p} = 2.95$	$K_{P_p} = 10, K_{D_p} = 100$
Gain for the torch slider	$K_{P_s} = 1700, K_{I_s} = 0.1, K_{D_s} = 690$	$K_{P_s} = 1700, K_{I_s} = 0.1, K_{D_s} = 690$
Sampling time	$\Delta T = 0.01\text{s}$	$\Delta T = 0.01\text{s}$



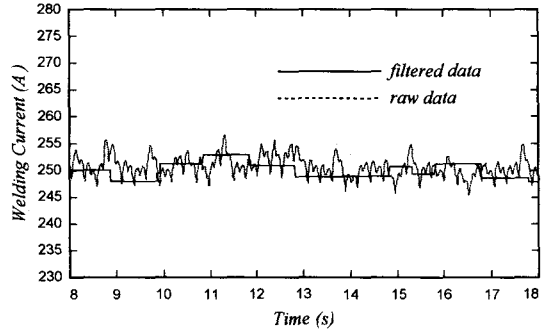
(a) The welding speed



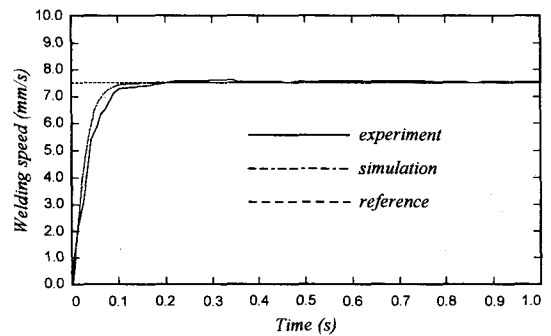
(b) The position of the mobile robot



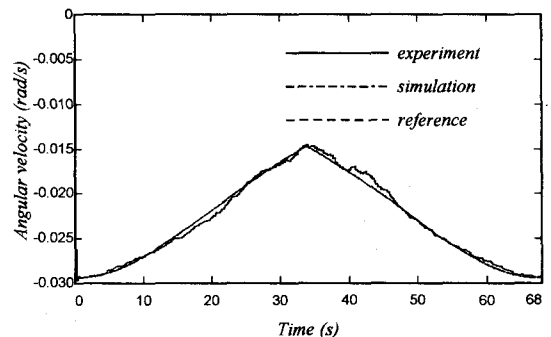
(c) Distance of the seam tracking sensor



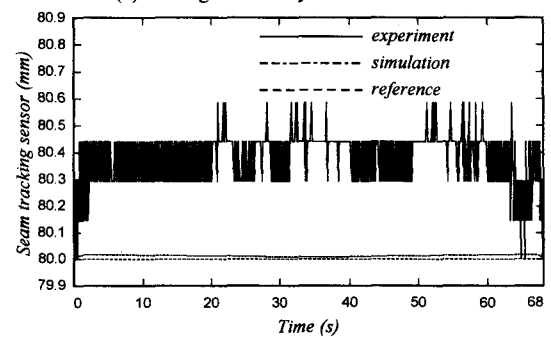
(d) Welding current from arc sensor
Fig. 5 Results for straight locomotion



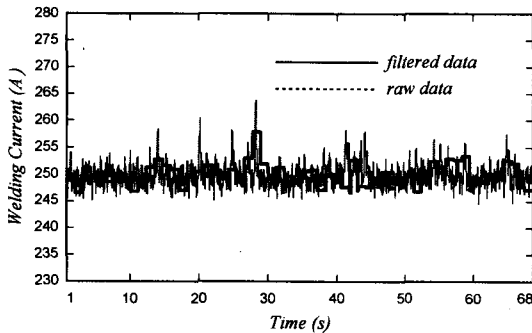
(a) The welding speed



(b) The angular velocity of the mobile robot



(c) Distance of the seam tracking sensor



(d) Welding current from arc sensor
Fig. 6 Results for turning locomotion

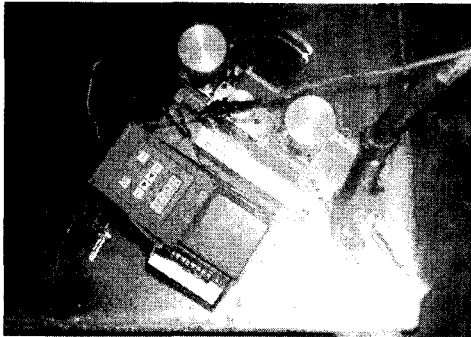


Photo 1 Scene of experiment at corner

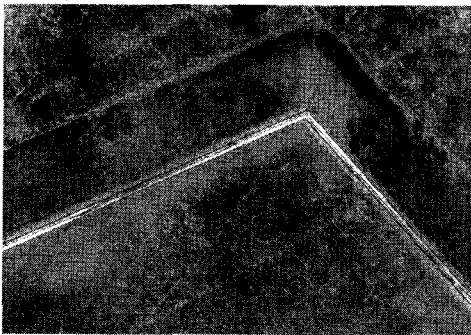


Photo 2 Welding bead of lattice type welding line

직선 주행 및 선회에 대한 시뮬레이션과 실험의 결과는 Fig. 5-6 에 나타내었다. 로봇이 격자형 용접 라인에 투입되면, 설계된 라인까지 추종한 후 턴 포인트까지 도달하기 전까지는 용접을 시작하지 않는다. 직선 주행시 용접 속도 및 로봇의 위치는 약 7 초 후에 추종이 잘되는 것을 Fig. 5 에서 볼 수 있다. 턴 포인트 감지 센서에 의해 로봇이 선회하면 용접이 시작되며, 선회시 용접 속도 및 토크의 위치가 설계된 기준 값에 잘 추정하는 것을 Fig. 6 에서 볼 수 있다. 또한, 아크 센서에 의해 용접 시작 1 초 후부터 센싱된 용접 전류 및 Average Filter 와 Exponential Filter 를 적용한 용접 전류를 Fig. 5(d)-6(d)에 나타내었다. 각 결과에 대해 약간의 노이즈에 의한 에러가 발생하였지만, 고속 회전하는 아크 센서의 위빙효과에 의해 고품질의 용접 비드를 얻을 수 있었다. 또한, Photo 1-2 는 개발된 격자형 용접 주행 로봇의 실제 용접 장면과 격자의 용접 비드를 보여준다.

결론

이 논문에서 개발된 격자형 용접 주행로봇의 주행 제어에 관하여 소개하였다. 직선 주행, 선회, 용접선 추적 제어에 관하여 각각 분리된 제어를 제시하였다. 직선 주행 제어 알고리즘은 dynamic nonlinear state feedback과 nonlinear state transformation 을 이용하여 설계하였고, 선회 제어는 주어진 용접 속도와 로봇의 각속도와의 관계 방정식을 이용하여 설계하였다. 끝으로, 용접선 추적 제어는 PID 제어를 이용하여 슬라이더의 위치를 제어하였다. 위 제안된 제어기의 성능은 시뮬레이션과 실험을 통해서 유효성을 입증하였다. 차후, 접촉식 센서를 제거하고 아크 센서만 이용하여 격자형 용접 주행 로봇을 제어하는 시스템을 연구 하려고 한다.

참고문헌

- (1) S. K. Jeong, G. Y. Lee, W. K. Lee, S. B. Kim, 2001, "Development of High Speed Rotation Arc Sensor and Seam Tracking Controller for Welding Robots", *Proceedings of the 2001 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*.
- (2) Y. B. Jeon, B. O. Kam, S. S. Park, S. B. Kim, 2001, "Seam Tracking and Welding Speed Control of Mobile Robot for Lattice Type Welding", *Proceedings of the 2001 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*.
- (3) C. J. Kang, Y. B. Jeon, B. O. Kam, S. B. Kim, 2000, "Development of Continuous/Intermittent Welding Mobile Robot", *Preprints of the national meeting of Autumn, The Korean Welding Society*, vol 36, pp. 31-33.
- (4) J. H. Chung, S. A. Velinsky, 1999, "Robust Control of a Mobile Manipulator Dynamic Modeling Approach", *Proceedings of the American Control Conference, San Diego, California*, pp. 2435-2439.
- (5) Shankar Sastry, 1999, "Nonlinear Systems, Analysis, Stability, and Control", *Springer-Verlag New York, Inc. Pub*.
- (6) K. Tsuchiya, T. Urakubo and K. Tsujita, 1998, "A Motion Control of a Space Manipulator by a Generalized Lyapunov Control", *Proc. 8th Workshop on Astrodynamics and Flight Mechanics, ISAS*, pp. 36-41.
- (7) G. Campion, G. Bastine, and B. d'Andrea-Novel, 1996, "Structural Properties and Classification of Kinematic and Dynamic Models of Wheeled Mobile Robots", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 12, no. 1, pp. 47-62.
- (8) R. Fierro, F. L. Lewis, 1995, "Control of a Nonholonomic Mobile Robot: Backstepping Kinematics into Dynamics", *Proceedings of the 34th Conference on Decision & Control, New Orleans, LA - December*, pp. 3805-3810.
- (9) N. Sarkar, X. Yun and V. Kumar, 1994, "Control of Mechanical Systems With Rolling Constraints: Application to Dynamic Control of Mobile Robots", *The International Journal of Robotics Research*, vol. 13, no. 1, pp. 55-69.
- (10) Yoshio Yamamoto and Xiaoping Yun, 1994, "Coordinating Locomotion and Manipulation of a Mobile Manipulator", *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 39, no. 6, pp. 1326-1332.
- (11) Xiaoping Yun and Yoshio Yamamoto, 1993, "Internal Dynamics of a Wheeled Mobile Robot", *Proceedings of the 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1288-1294.
- (12) B. d'Andrea-Novel, G. Bastine, G. Campion, 1991, "Modelling and Control of Non Holonomic Wheeled Mobile Robots", *Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1130-1135.