용접용 이륜 이동로봇의 모델링 및 적응 추종 제어

서진호† · Tring Hieu Bui** · Tan Tien Nguyen* · 김상봉**

Modeling and Adaptive Motion Tracking Control of Two-Wheeled Welding Mobile Robot (WMR)

Jin-Ho Suh, Tring Hieu Bui, Tan Tien Nguyen, and Sang-Bong Kim

Key Words : Welding mobile robot(WMR, 용접 이동로봇), Adaptive control(적응제어), Tracking error(추종 오차), Nonholonomic system(비홀로노믹 시스템), Reference welding path(목표 용접경로), Back-stepping control

Abstract

This paper proposes an adaptive control algorithm for nonholonomic mobile robots with unknown parameters and the proposed control method is used in numerical simulations for applying to a practical two-wheeled welding mobile robot(WMR). The proposed adaptive controller to track an arbitrary given welding path is designed by using back-stepping technique and is derived for a nonlinear model under the assumption such that the system parameters are partially known. Moreover, the proposed adaptive control system is stable in the sense of Lyapunov stability. Inertia moments of system are considered to be unknown parameters and their values can be estimated simply by using update laws proposed in an adaptive control scheme of this research. The simulation results are provided to show the effectiveness of the accurate tracking capability of the proposed controller for two-wheeled welding mobile robot with a smooth curved reference welding path.

1. 서 론

자동화 용접 이동로봇(automatic welding mobile robot, WMR)은 용접의 질적 향상, 생산성 향상, 경비 절감 그리고 정확성 증가와 같이 산업적 적용에 있어서 매우 실용적이고 유용함이 일반적으로 잘 알려져 있다. 따라서 복잡한 용접 환경아래에서 보다 정확한 용접 자동화를 실현하기 위해서는, 소형화·소경량화의 지능적 용접 이동로봇을 개발이 더욱 요구되어지고 있다. 즉, 용접 자동화에서 이동로봇은 이전에 프로그램 되어진 경로를 따라서 용접 토치(welding torch)를 이동시켜야 하고, 이러한 용접에 있어서 만족스러운 결과를 얻기 위해서는 용접 접합부분들이 단지 허용하는 편차내에서 정확한 위치에 있어야한다.

이동로봇은 비홀로노믹 구속에 대하여 잘 알려져 있는 시스템으로서, 이러한 시스템에 대한 많은 연구 결과들이 소개되어 있다. 특히, Sarkar 과 Fierro 에 의하여 제안되어진 연구 결과들은 언제나 존재하는 시스템 파라메터의 불확실성을 고려하지 않았고, Fukao 의 논문에서는 전체 시스템에 대한 미지 파라메터들에 오차의 갱신을 위한 적응 제어칙이 제안되었다. 또한 우리의 연구들에서는, 용접 자동화를 위한 이륜 이동로봇의 적용에 대한 결과들을 제안하였고, 격자형 용접을 위한 용접선 추종과 용접 이동로봇의 위치제어를 제안했었다. 특히, 이전의 연구들에서 제안되어진 컨트롤러는 단지 직선 추종을 위해서만 사용할 수 있었다. 하지만, 매끄러운(smooth) 곡선 추종에 대한 연구까지는 확장하지 못하였으므로, 매끄러운 경로 추종에 적용하기 위한 일반적 제어방법의 제안 문제가 여전히 남아 있었다.

† 부경대학교 기계공학부
E-mail : suhgang@hanmail.net
TEL : (051)620-1606 FAX : (051)621-1411
* Hochiminh City University of Technology
** 부경대학교 기계공학부

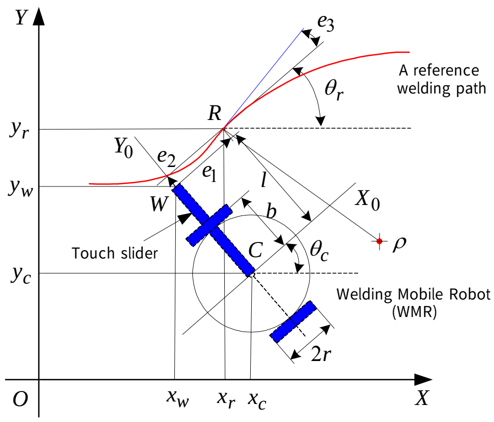


Fig. 1 Coordinates of two-wheeled WMR

이 논문에서는 부분적으로 알고 있는 시스템의 적응제어와 이것을 이룬 용접 이동로봇에 적용하기 위한 제어 방법을 제안한다. 컨트롤러 시스템은 Lyapunov 안정성의 의미에서 안정이 되도록 보여준다. 목표 용접 경로를 추종하기 위한 추종 컨트롤러를 설계하는데 오차 형태의 정의 함으로서 컨트롤러가 가능한 한 빠르고 정확하게 오차를 0으로 만들도록 설계하였다. 또한 본 논문에서는 용접 이동로봇의 실제 모델을 고려한 모의실험을 실행함으로서 제안되어진 적응 제어 알고리즘의 유효성을 보여준다.

2. 용접용 이륜 이동로봇의 모델링

2.1 이동로봇의 모델링

이륜 용접 이동로봇은 Fig. 1 에서 보여지는 것처럼 원형 모양으로 구성되었다. 로봇의 본체는 대칭형이고 무게중심은 본체의 기하학적 중심 C 이다. 또한 $O-XY$ 는 전체 좌표계이고 $C-X_0Y_0$ 는 용접 이동로봇 위의 고정 좌표계이다.

우리가 용접 이동로봇의 자세를 고려함으로서, 고려되어진 이동로봇의 구성은 다음과 같은 일반적인 좌표들로서 정의되어질 수 있다.

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

단, (x_c, y_c) 는 중심 C 의 좌표이고, θ_c 는 이동로봇의 회전각, 그리고 θ_r 과 θ_l 는 각각 좌·우 회전바퀴의 각이다.

용접 이동로봇은 i) pure rolling, ii) non-slipping 인비홀로노믹 구속조건을 가지고 있음을 가정함으로서, 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$\dot{x}_c\sin\theta_c-\dot{y}_c\cos\theta_c=0 \quad (2)$$

$$\dot{x}_c\cos\theta_c+\dot{y}_c\sin\theta_c+b\dot{\theta}_c=r\dot{\theta}_r \quad (3)$$

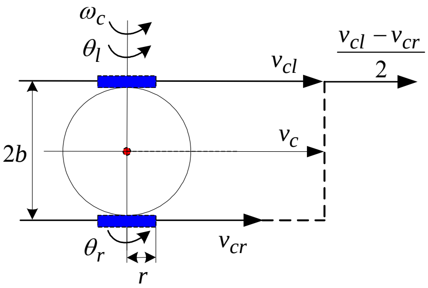


Fig. 2 The WMR with two actuated wheels

$$\dot{x}_c\cos\theta_c+\dot{y}_c\sin\theta_c-b\dot{\theta}_c=r\dot{\theta}_l \quad (4)$$

그러므로, 이러한 구속(constraint)들은 다음과 같이 다시 쓰여질 수 있다.

$$A(q)\dot{q}=0 \quad (5)$$

단, r 는 회전바퀴의 반지름이고, b 는 이동로봇의 중심점으로부터 회전바퀴까지의 거리이다. 그리고 $A(q)$ 는 다음과 같이 나타내어진다.

$$A(q)=\begin{bmatrix}\sin\theta_c & -\cos\theta_c & 0 & 0 & 0\\ \cos\theta_c & \sin\theta_c & b & -r & 0\\ \cos\theta_c & \sin\theta_c & -b & 0 & -r\end{bmatrix} \quad (6)$$

따라서, 우리는 제어입력으로서 $\theta(t)=[\theta_r\ \ \theta_l]^T$ 을 고려할 수 있고 다음과 같이 다시 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_c\\ \dot{y}_c\\ \dot{\theta}_c\\ \dot{\theta}_r\\ \dot{\theta}_l\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\frac{r}{2}\cos\theta_c & \frac{r}{2}\cos\theta_c\\ \frac{r}{2}\sin\theta_c & \frac{r}{2}\sin\theta_c\\ \frac{r}{2b} & -\frac{r}{2b}\\ 1 & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{\theta}_r\\ \dot{\theta}_l\end{bmatrix} \quad (7)$$

간단하게,

$$\dot{q}=S(q)\dot{\theta}(t) \quad (8)$$

라고 나타내고, $S(q)$ 는 $A(q)S(q)=0$ 와 같은 벡터들로서 이루어진 full-rank 행렬이다.

우리는 θ_r 과 θ_l 을 제외한 3-state 들에 촛점을 맞춤으로서, Fig. 2 에서 보여지는 변수들을 이용함으로서 다음 식에서 보여지는 변수들 사이의 관ㄱ계를 다음과 같은 방정식으로 표현되어질 수 있다.

$$\theta(t)=\begin{bmatrix}\dot{\theta}_r\\ \dot{\theta}_l\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\frac{1}{r} & \frac{b}{r}\\ \frac{1}{r} & -\frac{b}{r}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}v_c\\ \omega_c\end{bmatrix} \quad (9)$$

단, v_c 는 직선속도이고 ω_c 는 점 C 에서 이동로봇의 회전속도이다. 비홀로노믹 독립 구속들로서 다루어진 식 (1)에서 주어진 5 차원 일반화좌표들에 대한 기계 시스템을 고려함으로서, 우리는 다음의 식과 같은 내부 상태변수로서 v_c 와 ω_c 을 선택한다.

$$\eta = [v_c \ \ \omega_c]^T \tag{10}$$

그러므로, 우리는 식(9)에 식(7)을 대입함으로서 두개의 이동바퀴에 대한 용접 이동로봇의 일반적 형태를 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \\ \dot{\theta}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_c & 0 \\ \sin\theta_c & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_c \\ \omega_c \end{bmatrix} \tag{11}$$

이제, 우리는 식(5)에서 주어진 비홀로노믹 구속들을 가진 기계 시스템의 동적 방정식을 고려함으로서 다음과 같은 Euler-Lagrangian 공식으로 나타내어진다.

$$M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} = E(q)\tau - A^T(q)\lambda \tag{12}$$

단, $E(q)$ 는 full-rank 입력변환행렬, $A(q)$ 는 Jacobian matrix, 그리고 and τ 와 λ 는 각각 제어 입력과 구속력 벡터이다.

식(8)을 미분함으로서, 우리는 다음 식을 유도할수 있다.

$$\ddot{q} = S(q)\ddot{\theta} + \dot{S}(q)\dot{\theta} \tag{13}$$

식(12)에 식(13)을 대입하고 양변에 S^T 을 곱함으로서, 우리는 다음 식을 유도할 수 있다.

$$S^T(MS\ddot{\theta} + M\dot{S}\dot{\theta} + CS\dot{\theta}) = S^T E\tau \tag{14}$$

더구나, 식(12)는 $(S^T E)^{-1}$ 에 의하여 다음 식과 같이 간단하게 표현되어진다.

$$\overline{M}(q)\ddot{\theta} + \overline{C}(q,\dot{q})\dot{\theta} = \tau \tag{15}$$

단,

$$m = m_c + 2m_\omega$$

$$I = I_c + 2m_\omega(b^2 + d^2) + 2I_m$$

$$\overline{M} = \begin{bmatrix} \frac{r^2}{4b^2}(mb^2 + I) + I_\omega & \frac{r^2}{4b^2}(mb^2 - I) \\ \frac{r^2}{4b^2}(mb^2 - I)\frac{r^2}{4b^2} & \frac{r^2}{4b^2}(mb^2 + I) + I_\omega \end{bmatrix}$$

$$\overline{C} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{r^2}{2b} m_c d\dot{\theta}_c \\ -\frac{r^2}{2b} m_c d\dot{\theta}_c & 0 \end{bmatrix}$$

또한, m_c 는 회전바퀴를 포함한 용접 이동로봇의 무게이고, m_ω 는 이동로봇의 모터를 포함한 회전바퀴의 무게이다. I_c, I_ω 그리고 I_m 는 각각 회전바퀴를 포함한 용접 이동로봇의 관성모멘트, 바퀴축에 대한 모터를 포함한 바퀴의 관성모멘트, 그리고 바퀴직경에 대한 모터를 포함한 바퀴의 관성모멘트이다. 더구나 Fig. 1 에서 보여지는 것처럼, b, d, 그리고 r 은 이동로봇의 회전바퀴와 중심점사이의 거리, 이동로봇의 C 로부터 무게중심까지의 거리, 그리고 회전바퀴의 반지름을 각각 의미한다.

2.2 동적 방정식

Fig. 1 에서, 용접점 좌표 $W(x_\omega, y_\omega)$ 와 회전각 θ_ω 는 다음의 식처럼 중심점 C 로부터 계산되어질 수 있다.

$$\begin{aligned} x_w &= x_c - l\sin\theta_c \\ y_w &= y_c + l\cos\theta_c \\ \theta_w &= \theta_c \end{aligned} \tag{16}$$

그때, 용접점의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_w \\ \dot{y}_w \\ \dot{\theta}_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_c & -l\cos\theta_c \\ \sin\theta_c & -l\sin\theta_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_c \\ \omega_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\dot{l}\sin\theta_c \\ \dot{l}\cos\theta_c \\ 0 \end{bmatrix} \tag{17}$$

더구나 용접 이동로봇의 목표점의 운동방정식은 또한 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{y}_r \\ \dot{\theta}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_r & 0 \\ \sin\theta_r & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_r \\ \omega_r \end{bmatrix} \tag{18}$$

단, $R(x_r, y_r)$ 는 목표 경로내에 속도 v_r 로서 움직이는 목표점의 좌표이고, θ_r 는 목표 경로의 회전각이고, 그리고 v_r 과 ω_r 는 각각 그것의 기준 입력이다.

이 연구의 목적은 상수 속도에 대한 목표점 $R(x_r, y_r)$ 을 추종하기 위한 용접점 $W(x_\omega, y_\omega)$ 에 대한 컨트롤러를 설계하는 것이다. 그러므로, 우리는 다음과 같이 추종오차 $e = [e_1 \ e_2 \ e_3]^T$ 를 정의할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_c & \sin\theta_c & 0 \\ -\sin\theta_c & \cos\theta_c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x_\omega \\ y_r - y_\omega \\ \theta_r - \theta_\omega \end{bmatrix} \tag{19}$$

단, e_1, e_2, 그리고 e_3 는 실제 용접 이동로봇의 용접점으로부터 이동로봇의 위치까지의 오차를 나타낸다. 그때 식(19)에서 나타내어진 오차 방정식의 미분은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \\ \dot{e}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_r\cos e_3 \\ v_r\sin e_3 - \dot{l} \\ \omega_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 & e_2 + l \\ 0 & -e_1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_c \\ \omega_c \end{bmatrix} \tag{20}$$

우리는 다음 단원에서 제안되어지는 적응제어 알고리즘을 포현하기 위하여 간단하게 다음과 같은 표현법을 이용할 것이다.

$$\dot{\varsigma} = f(\varsigma) + g(\varsigma)\eta \tag{21}$$

따라서, 용접 이동로봇의 실제 동적 방정식은 식(9)와 식(15)사이의 관계를 이용함으로서 다시 표현되어질 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \frac{r}{m}m+\frac{1}{r}I_w & \frac{r}{2b}I+\frac{b}{r}I_w \\ \frac{r}{2}m+\frac{1}{r}I_w & -\frac{r}{2b}I-\frac{b}{r}I_w \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{v}_c \\ \dot{\omega}_c \end{bmatrix}+ \begin{bmatrix} \frac{r}{2b}m_c d\omega_c & -\frac{r}{2}m_c d\omega w_c \\ -\frac{r}{2b}m_c d\omega_c & -\frac{r}{2}m_c d\omega_c \end{bmatrix}\begin{bmatrix} v_c \\ \omega_c \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \tau_r \\ \tau_l \end{bmatrix} \quad (22)$$

다음 단원에서 적응 컨트롤러를 유도하기 위하여, 우리는 식(21)과 식(22)에 의하여 주어진 오차 방정식과 실제 동적 방정식을 이용할 것이다.

3. 적응제어 알고리즘

3.1 부분적 기저 시스템의 적응제어 알고리즘

다음과 같은 두개의 subsystem 으로 이루어진 비선형 시스템의 종류들은 다음과 같이 표현 되어진다.

$$\dot{\varsigma} = f(\varsigma)+g(\varsigma)\eta \quad (23)$$

$$\Delta_1\dot{\eta} = \Delta_2 h(\eta)\eta + k(\eta)u \quad (24)$$

단, $\varsigma \in \Re^n, \eta, u \in \Re^m, f \in \Re^n$ 이다. Δ_1 과 Δ_2 는 미지 파라메터인 θ_{1i}과 θ_{2i} 을 각각 포함하는 대각행렬이다. 더구나, 식(23)과 식(24)는 각각 주어진 시스템의 기지 부분으로 표현되는 ς - *subsystem* 과 η - *subsystem* 으로 정의되어진다.

이 논문에서, 우리는 적응 추종 컨트롤러가 미지 파라메터들을 가진 동적 모델에 대하여 설계되어질 수 있음을 보여주고자 하였으며, 이것은 다음과 같은 정리로서 간단히 요약되어질 수 있다.

정리 1: 다음과 같은 update law 들에 대하여,

$$\dot{\hat{\theta}}_{1i} = r_{1i}(\eta_i-\alpha_i)\dot{\alpha}_i \quad (25)$$

$$\dot{\hat{\theta}}_{2i} = -r_{2i}(\eta_i-\alpha_i)\sum_{i=1}^{m} h_{ij}(\eta)\eta_j \quad (26)$$

다음과 같이 표현되어지는 적응 추정 컨트롤러는

$$u = k^{-1}(\eta)[-K_2(\eta-\alpha)-g^T(\varsigma)\varsigma + \hat{\Delta}_1\dot{\alpha}-\hat{\Delta}_2 h(\eta)\eta] \quad (27)$$

식(23)과 식(24)에 의하여 주어진 비선형 시스템의 종류들을 안정화시킨다. 즉, 이러한 컨트롤러에 대하여 $t\to\infty$ 에서 $\varsigma\to 0$ 임을 의미한다. 여기서, $K_1\in\Re^{n\times n}$ 와 $K_2\in\Re^{m\times m}$ 는 각각 정정대각행렬이다. γ_{1i}, γ_{2i} $(i=1,2,...,m)$ 는 적응게인(adaptive gain)이면서 양수이고, $\hat{\Delta}_1$ 와 $\hat{\Delta}_2$ 는 미지 파라메터 Δ_1 와 Δ_2 의 측정값이다. 또한 stabilizing α 는 다음 식을 만족한다.

$$g(\varsigma)\alpha = -k_1\varsigma - f(\varsigma) \quad (28)$$

(Proof) 본 정리에 대한 증명은 참고문헌 [12]에 상세히 설명되어 있으므로 본 논문에서는 생략함.

보조정리 1 : Δ_i (i =1,2)가 $\Delta_i \to \theta_i$와 같은 스칼라 일 때, 식(25)와 식(26)에서 주어진 update law 들은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\dot{\hat{\theta}}_1 = \gamma_1\sum_{i=1}^{m}(\eta_i-\alpha_i)\dot{\alpha}_i \quad (29)$$

$$\dot{\hat{\theta}}_2 = -\gamma_2\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m}(\eta_i-\alpha_i)h_{ij}(\eta)\eta_j \quad (30)$$

3.2 용접용 이동로봇에 대하여 제안되어진 적응제어 알고리즘의 응용

이 단원에서, 우리는 용접용 이륜 이동로봇에 대한 적응제어 알고리즘을 적용할 것이다. 먼저, $\alpha=[\alpha_1\ \alpha_2]^T$ 와 식(21)에 대한 제어입력으로서 속도 v_c와 ω_c 에 의하여 고려되어진 오차 방정식을 쉽게 실행할 수 있다. 즉,

$$\varsigma=\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix}, \quad f(\varsigma)=\begin{bmatrix} v_r\cos e_3 \\ v_r\sin e_3-\dot{l} \\ \omega_r \end{bmatrix}$$

$$g(\varsigma)=\begin{bmatrix} -1 & e_2+l \\ 0 & -e_1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad \eta=\begin{bmatrix} v_c \\ \omega_c \end{bmatrix}. \quad (31)$$

그때, 정리 1 에서의 식(28)은 또한 다음의 식으로 다시 쓰여질 수 있다.

$$\begin{bmatrix} -1 & e_2+l \\ 0 & -e_1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix}=-K_1\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix}-\begin{bmatrix} v_r\cos e_3 \\ v_r\sin e_3-\dot{l} \\ \omega_r \end{bmatrix} \quad (32)$$

단, $K_1 = diag(k_{11}, k_{12}, k_{13})$. 더구나, $\eta=\alpha$ 이므로 다음의 식

$$\dot{l} = v_r\sin e_3 + k_{12}e_2 \quad (33)$$

에 의하여 주어지는 용접 이동로봇의 토치에 대한 제어칙(control law)에 대하여 다음의 안정화 함수(stabilizing function)을 가짐을 알 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_c \\ \omega_c \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} l(\omega_r+k_{13}e_3+v_r\cos e_3+k_{11}e_1 \\ \omega_r+k_{13}e_3 \end{bmatrix} \quad (34)$$

동적 모델은 제어입력으로서 이동바퀴에 작용하는 토크 $\tau=[\tau_r\ \ \tau_l]^T$ 에 의하여 고려되어진다. 식

(22)의 양변에 $\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$ 을 곱함으로서, 다음 식을 유도할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} rm+I\omega & 0 \\ 0 & \frac{b}{r}I+\frac{2b}{r}I\omega \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{v}_c \\ \dot{\omega}_c \end{bmatrix}$$

$$\frac{r}{b}m_c d\begin{bmatrix} 0 & b\omega_c \\ -\omega_c & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} v_c \\ \omega_c \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \tau_r \\ \tau_l \end{bmatrix} \quad (35)$$

그때, 식(24)을 이용함으로서, 식(35)는 또한 다음의 식으로 표현되어질 수 있다.

$$\Delta_1\dot{\eta}=\Delta_2 h(\eta)+k(\eta)u \quad (36)$$

용접 이동로봇에서, 이동바퀴들은 기어모터들에 의하여 운행되어지고 토치 길이는 목표 용접경로를 따라서 변화되어진다. 그러나, 이러한 것들을 기하학적 중심과 무게중심사이에서의 거리와 관성모멘트을 직접 측정하기는 어렵다. 따라서, 이 논문에서 θ_{ij} 는 미지 시스템 파라메터인 것으로 간주되어진다.

앞 단원에서, 적응 추종 컨트롤러를 유도하기 위하여 제안되어졌던 정리 1 을 고려함으로서, 제어입력 $u=[\tau_r \;\; \tau_l]^T$ 은 다음과 같이 계산되어질 수 있다.

$$\begin{aligned} \tau_r &= \tfrac{1}{2}\{-k_{21}(v_c-\alpha_1)-k_{22}(\omega_c-\alpha_2)-(1+l)e_1 \\ &\quad +e_3+\hat{\theta}_{11}\dot{\alpha}_1+\hat{\theta}_{12}\dot{\alpha}_2+\hat{\theta}_2\,\omega_c(b\omega_c-v_c)\} \\ \tau_l &= \tfrac{1}{2}\{-k_{21}(v_c-\alpha_1)-k_{22}(\omega_c-\alpha_2)-(1-l)e_1 \\ &\quad +e_3+\hat{\theta}_{11}\dot{\alpha}_1+\hat{\theta}_{12}\dot{\alpha}_2+\hat{\theta}_2\,\omega_c(b\omega_c-v_c)\} \end{aligned} \quad (37)$$

단, α 는 식(34)에서 주어진 것이므로, 이것의 무분 또한 쉽게 계산되어질 수 있다. 더구나, 식(34)에서 사용되어진 K_2 는 다음과 같이 정의되어진다.

$$K_2=diag(k_{21},k_{22}) \quad (38)$$

따라서, update law 는 다음과 같이 구해진다.

$$\dot{\hat{\theta}}_{11}=\gamma_{11}(\eta_1-\alpha_1)\dot{\alpha}_1 \quad (39)$$

$$\dot{\hat{\theta}}_{12}=\gamma_{12}(\eta_2-\alpha_2)\dot{\alpha}_2 \quad (40)$$

$$\dot{\hat{\theta}}_{11}=-\gamma_{11}(\eta_1-\alpha_1)\sum_{j=1}^{2}h_{1j}(\eta)\eta_j \quad (41)$$

$$\dot{\hat{\theta}}_{12}=-\gamma_{12}(\eta_2-\alpha_2)\sum_{j=1}^{2}h_{2j}(\eta)\eta_j \quad (42)$$

4. 모의실험

이 단원에서, 우리는 앞의 단원에서 설계되어진 적응 추종 컨트롤러을 이용함으로서 용접 이동로봇의 동정 모델에 대한 모의실험을 실행한다. 본

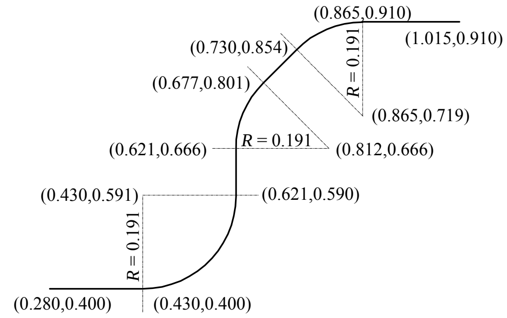


Fig. 3 The reference welding path

실험에서 사용되어지는 파라메터들은 실제 제작되어진 용접 이동로봇의 실험을 실행하기 위하여, 이전의 연구에서 사용되어진 파라메터들을 동일하게 사용하였다[???].

목표 경로는 Fig. 3 에서와 같이 선택되어지고, 용접 속도는 7.5mm/sec 이다. 또한 컨트롤러내에 상수들은 각각 다음과 같이 선택되어진다.

$$k_{11}=4.2,\; k_{12}=8,\; k_{13}=3.4,\; k_{21}=k_{22}=10.$$

더구나, 적응게인(adaptive gain)은 또한 다음과 같이 결정되어진다.

$$\gamma_{11}=\gamma_{12}=\gamma_{21}=\gamma_{22}=1$$

용접 이동로봇이 기준 경로를 추종하고자 할 때, 이동로봇의 움직임은 Fig. 4 에서 보여지는 것처럼 기준 경로를 추정해야 하고 그리고 출발해서 부터 초기 오차을 감소시키도록 매우 빠르게 위치를 수정하고 있음을 알 수 있다.

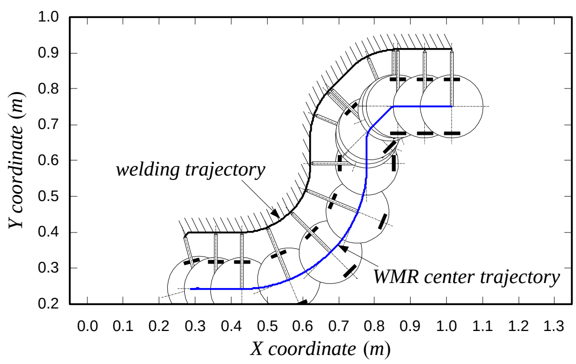


Fig. 4 The moving path of WMR

Fig. 5 와 Fig. 6 은 각각 직선 출발과 곡선 이동에서의 용접점의 속도에 대한 추종 오차을 나타내고 있다. 또한 이러한 추종 오차에 대응하는 용접 속도가 용접 이동로봇이 직선경로에서 출발할 때와 곡선에서의 용접 속도를 Fig. 7 에서 보여주고 있다. 이러한 모의실험 결과들에서, 제안되어진 제어 알고리즘의 유효성을 보여 주고 있고, 또한 제안되어진 컨트롤러가 우수한 추종 성능을 나타내고 있음을 알 수 있었다.

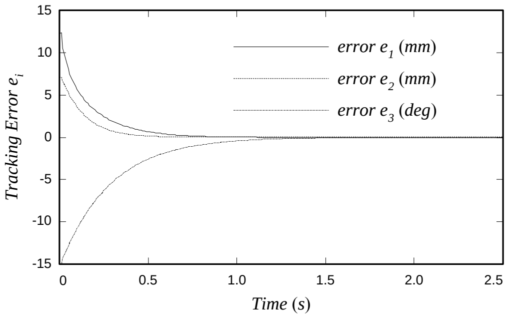


Fig. 5 Tracking errors at beginning

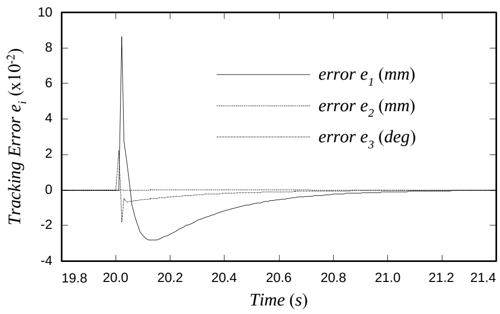
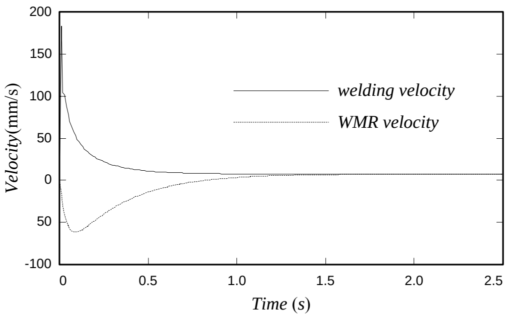
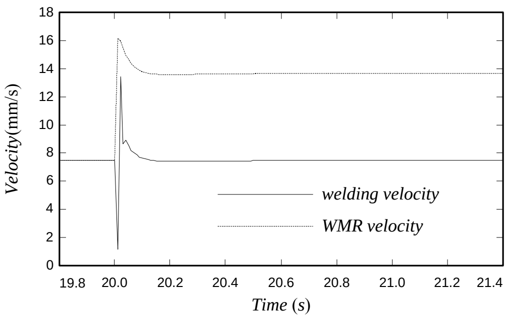


Fig. 6 Tracking error at corner



(a) At beginning



(b) At corner

Fig. 7 The velocities of welding point and WMR

5. 결론 및 고찰

이 논문에서, 우리는 Lyapunov 함수에 기초한 미지 시스템에 대한 비홀로노믹 용접 이동로봇에 대한 적응 추종제어 알고리즘을 설계하는 방법을 제안하였다. 더구나, 컨트롤러 시스템은 Lyapunov 안정성의 의미에서 안정(stable)이다. 주어진 시스템의 관성 모멘터들은 미지 시스템의 파라메터들로서 고려되어졌고, 그들의 값들은 적응 제어 알고리즘의 update law 을 이용함으로서 측정되어질 수 있다.

제안되어진 제어 알고리즘은 컴퓨터 모의실험에 의하여 수행되어졌고, 이러한 실험 결과는 제안되어진 적응 제어 알고리즘의 유효성을 나타내고 있다. 따라서, 제안되어진 컨트롤러는 좋은 성능을 나타내기 위한 용접 이동로봇의 제어에 사용되어질 수 있을 것이다.

참고문헌

(1) Samson, C. and Ait-Abderrahim, K., Feedback Control of nonholonomic wheeled Cart in Cartesian Space, Proceeding of IEEE ICRA, (1999), pp.1136-1141.

(2) N. Sarkar, X. Yun, and V. Kumar (1994), Control of Mechanical Systems with Rolling Constraints, The Int. Journal of robotics research, Vol.13, No.1, pp.55-69.

(3) R. Fierro, F. L. Lewis (1995), Control of a Nonholonomic Mobile Robot, Proceedings of IEEE CDC, pp.3805-3810.

(4) Krstic, M., Kanellakopoulos, I., and P., Nonlinear and adaptive control design, (1995), New York, Wiiley.

(5) Yang, J.M. and Kim, J.H. , Sliding Mode Motion Control of Nonholonomic Mobile Robot, Proceeding of IEEE ICRA, (1999), pp. 15-23

(6) T. Fukao, H. Nakagawa, and N. Adachi (2000), Adaptive Tracking Control of a Nonholonomic Mobile Robot, Transactions on IEEE Robotics and Automation, Vol.16, No.5, pp.609-615.

(7) Gonzalez, S.P., Aramada, M.A., and Jimenez, M.A. , Ship Building with Power, IEEE Robotics and Automation Magazine, (2000), p. 35-43.

(8) Lefeb, E., et al., Observer Based Kinematic Tracking King Controlller for a Unicycle Mobile robot, Proceeding of IEEE ICRA, (2001), p. 2084-2089.

(9) T. C. Lee and et al. (2000), Tracking Control of Unicycle-Modeled Robots using a Saturation Feedback Controller, Transactions on IEEE control system technology, Vol.9, No.2, pp.305-318.

(10) Y. B. Jeon, S. S. Park, and S. B. Kim (2001), Modeling and Motion Control of Mobile Robot for Lattice Type of Welding Line, KSME international journal, vol16, No.1, pp.1207-1216.

(11) J. E. slotine, W. Li (1991). *Applied Nonlinear Control*, pp.122-125, Prentice-Hall.

(12) J. H. Suh, T. H. Bui, T. T. Nguyen, and S. B. Kim (2002), Adaptive Motion Tracking Control of a Nonholonomic Two Wheeled Welding Mobile Robot, JSME International Journal, *To be submitted*.