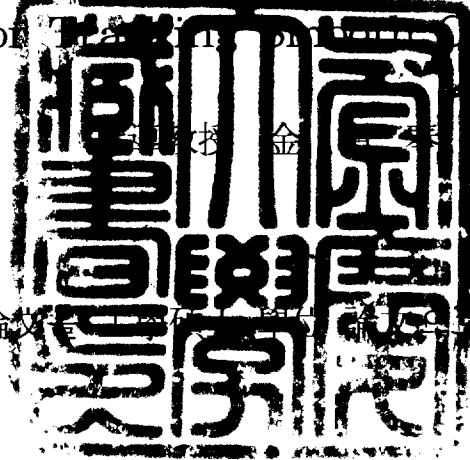


工學碩士 學位論文

완만한 곡선 경로추적용 용접이동로봇의
비선형 적응제어

Nonlinear Adaptive Control of Welding Mobile
Robot for Trajectory Tracking on Curved Path



이 論文은 釜慶大學校 大學院 知能機械 工學科 金榮奎 先生에 提出함

2005年 2月

釜慶大學校 大學院

知能機械 工學科

金 榮 奎

金榮奎의 工學碩士 學位論文을 認准함

2005년 2月 25日

主審 : 工學博士

安斗星



副審 : 工學博士

吳明錫



委員 : 工學博士

金相奉



목 차

Abstract	1
제 1장	
서론	3
1.1 연구의 배경 및 동기	3
1.2 연구내용과 연구범위	6
제 2장	
용접이동로봇의 모델링 및 문제설정	7
2.1 문제설정	7
2.2 운동학적 모델링	8
2.3 동력학적 모델링	12
제 3장	
제어기 설계	16
3.1 서언	16
3.2 백스텝핑법을 이용한 비선형 제어기 설계	17
제 4장	
이동로봇의 구성	29
4.1 오차측정용 센서설계	29

4.2 통괄제어시스템의 하드웨어	32
-------------------------	----

제 5장

시뮬레이션 및 실험결과	34
--------------------	----

5.1 서언	34
--------------	----

5.2 백스텝핑법을 이용한 단순 비선형 제어기의 시뮬레이션 및 실험 결과	36
---	----

5.3 비선형 적응제어기의 시뮬레이션 및 실험결과	42
-----------------------------------	----

5.4 Bui의 비선형 적응제어기 시뮬레이션 및 실험결과	54
---------------------------------------	----

제 6장

결론	62
----------	----

Reference	65
-----------------	----

Publications and Conferences	71
------------------------------------	----

감사의 글	72
-------------	----

Nonlinear Adaptive Control of Welding Mobile Robot for Tracking Smooth Curved Path

Young Gyu Kim

*Dept. of Intelligent Mechanical Eng., College of Eng.,
Pukyong National University*

Abstract

Today, the automatic welding system is deeply needed for improvement in quality, productivity and labor conditions. Generally, a two-wheeled mobile robot is used for the automatic welding system. The welding mobile robot(WMR) must be controlled for the automatic welding work. There are some problems to control the mobile welding robot as follows. First, the motion control must be done in view of keeping constant welding velocity and tracking precise target welding path even whether the WMR follows the straight line or curved line. Second, to get good welding line, the welding velocity must be constant or at least in a limited range during welding process. Third, position of WMR must be controlled to satisfy the limited length of the torch slider. Forth, the torch slider must be controlled for the end effect of the welding electrode(welding point) to take on the track of the reference

welding path. Fifth, good tracking is required for the development of welding techniques. Finally, hardware and software to implement this welding techniques must be developed.

In this thesis, a simple nonlinear controller and a nonlinear adaptive controller for two-wheeled welding mobile robot to track a smooth curved welding path are proposed. The mobile robot is considered in terms of dynamics model in Cartesian coordinates with unknown parameters of robot's mass, moment of inertia, wheel radius and distance between the rear wheel and the center of mobile platform. The system is designed to have three degrees of freedom: two wheels and one torch slider for faster tracking due to the nonholonomic constraint. To obtain the controllers, the tracking errors are defined, and control laws are derived using backstepping technique based on Lyapunov function to guarantee that the errors converge to zero asymptotically. In this adaptive controller, the partially unknown parameters are estimated using update laws in adaptive control scheme. To implement experiment, a rotary type of sensor with potentiometer is used to measure tracking errors. The control system is based on PIC18F452. The simulation and experimental results are shown to verify the good performance of the control law. Two adaptive controllers proposed by T. H Bui are introduced. Simulation and experimental results between the proposed two controllers in this thesis and two adaptive controllers proposed by Bui are compared. The effectiveness of our two controllers is verified by the comparison.

제 1 장

서 론

1.1 연구의 배경 및 동기

오늘날, 용접공정은 품질, 생산성, 작업조건의 개선을 위해 많은 노력을 하고 있다. 해양구조물분야에 있어서, 용접공정은 마루, 거들보에 의해 공간적으로 폐쇄되어 있고, 작업자가 열악한 작업환경에 노출되어 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해, 자동용접용 로봇시스템들이 최근 개발되었다. Santos등은 2000년 ROWER 시스템을 개발하였다[18]. 이 시스템은 해양구조물 공정응용을 위해 복잡한 4개의 다리를 가진 이동 대차기계이다. Kim 등은 2000년 지능형 선박용접로봇을 위해 용접환경의 비주얼 감지 및 인식을 제안했다[20]. Jeon 및 Kam 등은 2001년, 격자형 용접을 위해 간단한 용접이동로봇(WMR : Welding mobile robot)을 개발하였으며[8-9], T. H. Bui등은 2003년 완만한 곡선경로용접을 위한 용접이동로봇을 개발하였다[3-4]. 이러한 용접이동로봇은 이륜구동 이동로봇의 대차와 용접토치로 구성되어있다. 따라서 용접이동로봇은 이륜구동 이동로봇의 성질을 가지고 있다. 이러한 이동로봇은 비홀로노믹 구속조건을 지닌 잘 알려진 시스템이다.

이동로봇의 추적제어에 대한 여러 문헌이 있다. Kanayama는 1991년 비홀로노믹 차량의 안정추적 제어법을 제안하였다[41]. 오차의 구조를 정의하고, 리아푸노프 함수, 오차운동방정식 등을 사용하여 제어기를 유도하였다. Sarkar는 1994년 통괄시스템의 입출력 안정성, 라그란제 안정성을 보장하는 비선형 피드백을 제안하였다[39]. Fierro는 1995년 백스텝핑 해석법을 사용하여 운동학적 제어칙과 토크 제어칙이 결합된 제

어칙을 제안하였다[37]. 그러나 이 제어칙을 실제로는 정확히 얻기가 거의 불가능하여 이동로봇의 매개변수 추정이 필요하다. Zeng는 1995년 Pontryagin 최대원리로서 이동로봇의 목표물 추적을 위한 시간최적 제어법칙을 제안하였다[38]. Yun은 1996년 운동학에 집중적으로 관심을 두어, 동력학적 피드백 선형화를 사용하여 두개의 구동바퀴를 가진 차량의 제어를 제안하였다[30]. Mukherjee는 1996년 비선형 오실레이터를 사용해 비홀로노믹 이동로봇의 접근-안정 피드백 안정화를 제안했다[29]. Taybei는 1997년 입력외란이 존재할 때, 지수적으로 안정화시키는 적응 제어기와 비홀로노믹 시스템의 안정화를 위한 불연속 시불변 상태 피드백 제어기의 설계를 위한 백스텝핑 절차를 제시했다[27]. Tsuchia는 1999년 리아푸노프 제어를 확장시킴으로서, 운동학적 모델을 기반으로 한 제어기를 설계했다. Fukao는 2000년 비홀로노믹 이륜구동 이동로봇의 운동모델을 위해 운동학적 제어기와 토크 제어기의 통합을 제시하였으며, 운동학적 적응 추적 제어기를 제시한 후, 미지의 매개변수를 지닌 토크 적응 제어기를 운동학적 제어기를 사용하여 유도하였다. Lee는 2001년 unicycle-modeled mobile의 추적제어를 위한 포화 피드백 제어기를 제안하였다[11].

용접이동로봇에 대한 몇몇 문헌이 있다. Jeon은 격자형 용접을 위한 용접이동로봇의 용접선 추적과 운동제어를 제안하였다[9-10]. 이동로봇 대차의 직선 및 회전운동과 토치슬라이드를 제어하기 위한 3개의 제어기로 구성되어 있다. Kam은 각 스텝시간에서 시행착오법에 근거하여 직선형 용접을 위한 제어알고리즘을 제안하였다[15]. Kam의 제어알고리즘은 용접선 추적센서가 토치슬라이더와 함께 움직이며, 만일 오차가 발생하면, 제어기가 미리 프로그램된 계획에 근거하여 용접이동로봇의 운동을 수정하게 된다. 그러나 이러한 제어기는 직선경로의 추적에만 사용되며 완만한 곡선경로의 추적에는 사용될 수 없다. Jeon 과 Kam등

에 의해 제시된 제어기들은 실제 시스템에 성공적으로 적용되었다. 그러나 이러한 제어기들은 일반적으로 완전한 곡선경로 추적을 위해 결부시킬 때 복잡성과 일반성을 잃는 등 아직까지 여러 문제점이 남아있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해, T. H. Bui 등은 2003년 관성모멘트를 미지의 매개변수로 가진 리아푸노프 함수를 사용해 완전한 곡선 용접경로를 추적하는 이륜구동 용접이동로봇을 위한 비선형 적응 제어기를 제시했다[3-4].

본 논문 역시 Jeon과 Kam등에 의해 제시된 제어기들[9,15]의 문제점을 해결하기 위해, 백스텝핑법을 이용한 단순 비선형 제어기와 T. H. Bui 등이 제시한 적응 제어기개발[3-4]의 후속으로 질량, 관성모멘트, 바퀴직경 및 뒷바퀴와 이동대차중심 사이의 거리가 미지인 경우 완전한 곡선 용접경로를 추적하는 이륜구동 용접이동로봇을 위해 비선형 적응 제어기를 제시한다. 이러한 제어기를 구현하기 위해 제어 시스템의 설계가 필요하다. 본 논문에 사용된 제어시스템은 서보DC모터 제어기용 2개와 주제어기용 1개로 모두 3개의 PIC18F452 마이크로 컨트롤러 통합에 기반하고 있다. 2개의 서보제어기는 각각 한 개의 엔코더를 사용하여 간접적인 서보제어를 수행할 수 있다. 마스터로서 기능하는 주제어기는 슬레이브 역할을 하는 2개의 서보제어기와 I2C통신을 통해 연결한다. 주제어기의 A/D포트는 오차를 감지하는 두 개의 포텐서미터에 연결된다. 작동을 위해, 주제어기는 오차측정용 센서로부터 신호를 받은 후 제어칙이 샘플링시간 10ms동안의 오차를 기반으로 하여 만들어진 다. 그리고 각각 I2C통신을 통해 두 개의 서보 제어기로 결과신호를 보낸다.

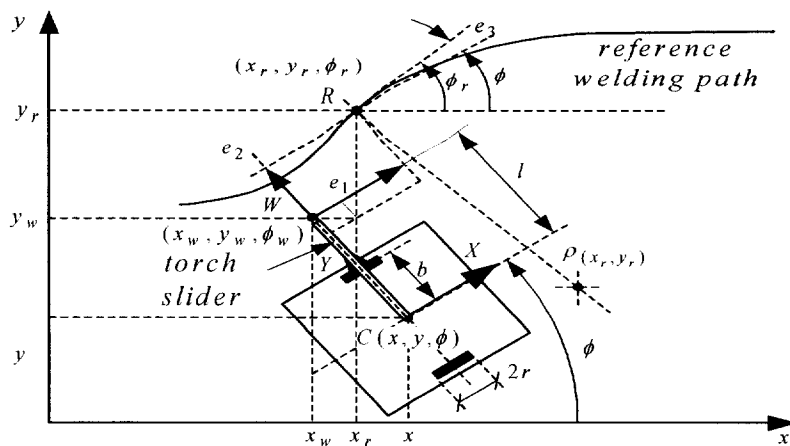
1.2 연구내용과 연구범위

본 논문은 6장으로 구성되어 있으며, 각 장의 내용을 다음과 같이 요약한다.

- 제1장 : 본 연구에 관련된 문헌의 소개 및 본 연구의 동기와 연구의 구성이 소개된다.
- 제2장 : 용접이동로봇의 시스템 모델링과 문제설정을 제시한다.
- 제3장 : 백스텝핑법을 사용한 단순 비선형 제어기와 미지의 매개변수를 가지는 모델링에서, 이륜구동 용접이동로봇을 제어하는 비선형 적응 추적 제어기를 설계한다. 미지의 매개변수는 이동로봇의 질량, 관성모멘트, 바퀴의 반경, 이동로봇의 대차중심과 바퀴사이의 거리이다.
- 제4장 : 개발한 오차측정용 센서 및 하드웨어를 소개한다.
- 제5장 : 시뮬레이션과 실험을 통해 제시한 제어기의 유효성을 검증한다. 특히 Bui 등이 제시한 적응 제어기와 비교 검토한다.
- 제6장 : 본 논문의 결론을 소개한다.

용접이동로봇의 모델링 및 문제설정

제어목적은 Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 목표 용접속도로 용접점 W 가 목표점 R 을 추적하도록 제어기를 설계하는 것이다. 이렇게 하기 위해서는 시스템의 정확한 모델링, 추적제어기 설계, 오차의 측정방법, 실험을 수행하기 위한 각종 하드웨어의 설계가 필요하다. 모델링에는 시스템의 속도성분이 목표 추적속도를 완전 추적가능하다는 측면에서 운동학적 모델링, 실제시스템의 입력인 토크를 계산 또는 측정하는 측면에서 동력학적 모델링이 있다. 제어기 설계에서는 시스템이 미지의 매개변수를 가지는 경우의 적응 제어기를 소개하며, PIC18F452 마이크로 컨트롤러를 이용하여 제어기를 구현하는 일이다. 본 논문에서 사용되어진 용접이동로봇은 Fig. 1에 나타나져 있다



- 7 -

2.2 운동학적 모델링 (Kinematic modeling)

이 절에서는 용접이동로봇의 운동학적 방정식이 좌표계와 목표 용접 경로와 관련하여 비홀로노믹 구속조건을 지닌다고 고려한다.

본 연구에 사용된 용접이동로봇은 용접분야로의 응용을 위해 기계구조에 대해 약간의 수정을 가한 Fig. 2와 같은 용접이동로봇으로 취급하기로 한다. 따라서 이동대차는 비홀로노믹 구속조건을 가진다. 이동로봇이 초기자세에서 용접선 추적오차가 발생한다면, 이동로봇의 운동에 수직인 추적오차가 천천히 수렴하도록 한다. 그러므로 용접이동로봇은 두 개의 구동바퀴와 한 개의 토치슬라이더로 3자유도를 가지도록 설계된다.

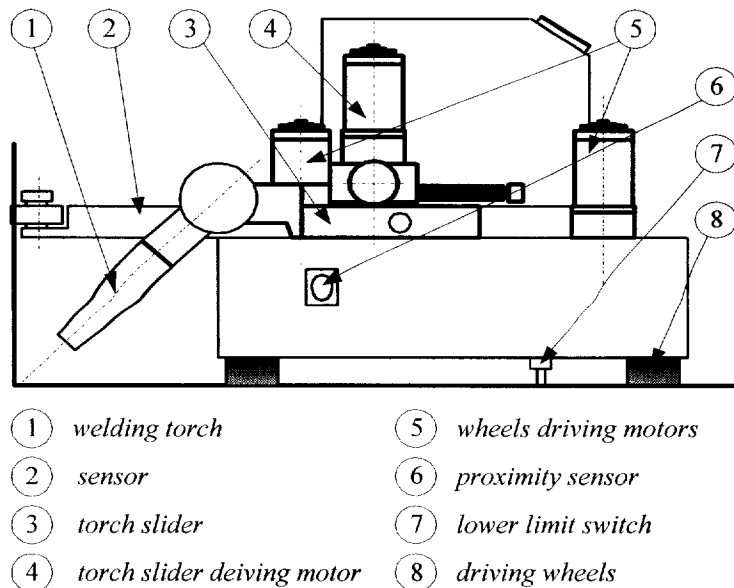


Fig. 2 WMR configuration

이동로봇의 자세는 일반화된 좌표계로서 다음과 같이 표현가능하다:

$$\mathbf{q} = [x \ y \ \phi]^T \quad (2-1)$$

여기서 (x, y) 는 용접이동로봇 중심의 Cartesian 좌표계이며 ϕ 는 용접 이동로봇의 전진각이다.

또한 내부 상태변수를 다음과 같이 정의한다.

$$\mathbf{z} \equiv [v \ w]^T = \begin{bmatrix} \dot{x}\cos\phi + \dot{y}\sin\phi \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} & \frac{r}{2} \\ \frac{r}{2b} & -\frac{r}{2b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_r \\ \dot{\theta}_l \end{bmatrix} = \mathbf{J} \boldsymbol{\eta} \quad (2-2)$$

바퀴는 미끄러짐 없이 회전한다고 가정한다. 즉 로봇은 구동바퀴에 수직인 방향으로만 움직인다고 가정한다. 해석적으로, 이동대차는 다음과 같은 조건을 만족시킨다.

$$\begin{cases} \dot{y}\cos\phi - \dot{x}\sin\phi = 0 \\ or \\ \mathbf{A}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} = 0 \end{cases} \quad (2-3)$$

여기서

$$\mathbf{A}(\mathbf{q}) = [-\sin\phi \ \cos\phi \ 0] \quad (2-4)$$

첫째, Cartesian 공간에서 용접이동로봇의 운동학적 방정식(kinematic equation)은 다음과 같다.

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 \\ \sin \phi & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} = S_0(q)z \quad (2-5)$$

$$A(q)S_0(q) = 0 \quad (2-6)$$

여기서,

$S_0(q)$ 는 $A(q)$ 의 null 행렬이다.

두 구동바퀴의 각속도와 v, w 사이의 관계식은 다음과 같다.

$$\eta = \begin{bmatrix} w_{rw} \\ w_{lw} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_r \\ \dot{\theta}_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/r & b/r \\ 1/r & -b/r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/r & b/r \\ 1/r & -b/r \end{bmatrix} z \quad (2-7)$$

여기서, w_{rw}, w_{lw} 는 좌우 구동바퀴의 회전 각속도이며, b 는 용접이동로 붓의 중심점과 구동바퀴사이의 거리, r 은 바퀴직경이다.

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 \\ \sin \phi & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} = S_0(q)z = S(q)\eta \quad (2-8)$$

$$A(q)S(q) = 0 \quad (2-9)$$

$$S(q) = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} \cos \phi & \frac{r}{2} \cos \phi \\ \frac{r}{2} \sin \phi & \frac{r}{2} \sin \phi \\ \frac{r}{2b} & -\frac{r}{2b} \end{bmatrix} \quad (2-10)$$

여기서, $S(q)$ 는 $A(q)$ 의 null 행렬이다.

둘째, 토치위의 용접점 $W(x_w, y_w)$ 와 경사각 ϕ_w 은 용접이동로봇의 중심 $C(x, y, \phi)$ 로부터 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$\begin{cases} x_w = x - l \sin \phi \\ y_w = y + l \cos \phi \\ \phi_w = \phi \end{cases} \quad (2-11)$$

여기서, l 은 토치길이이다.

식(2-11)의 도함수는 다음 식과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_w \\ \dot{y}_w \\ \dot{\phi}_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -l \sin \phi \\ \sin \phi & l \cos \phi \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\dot{l} \sin \phi \\ \dot{l} \cos \phi \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-12)$$

여기서 고정토치인 경우에는 오른쪽 2번째 항은 제거된다.

목표경로위의 목표점 $R(x_r, y_r)$ 이 경사각 ϕ_r 를 지닌 채 일정속도 v_r 로 움직인다고 가정한다. 이때, 그 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{cases} \dot{x}_r = v_r \cos \phi_r \\ \dot{y}_r = v_r \sin \phi_r \\ \dot{\phi}_r = w_r \end{cases} \quad (2-13)$$

여기서, ϕ_r 은 v_r 과 x 축사이의 각으로 정의되며, w_r 은 v_r 의 각변화율(각속도)이다.

2.3 동력학적 모델링(Dynamic modeling)

용접이동로봇의 동력학적 모델은 라그랑제(Lagrange)방정식을 사용하여 얻는다. 용접이동로봇의 대차는 수평면에서 움직인다고 가정하여 위치에너지를 무시하면, Fig. 1에서 보이는 점 $C(x, y, \phi)$ 는 이동로봇의 대차중심점이므로 이 중심점C에 대한 이동로봇과 바퀴의 전체 에너지는 다음과 같다.

$$K = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}Iw^2 + \frac{1}{2}I_w w_{rw}^2 + \frac{1}{2}I_w w_{lw}^2 \quad (2-14)$$

여기서 m 은 이동대차의 질량, v 는 이동대차 중심점의 선속도, I 는 이동대차의 중심점을 지나는 수직 축에 대한 전체 관성모멘트, w 는 이동대차 중심점의 회전각속도, I_w 는 구동바퀴의 바퀴 축에 대한 관성모멘트, w_{lw} , w_{rw} 는 각각 좌우바퀴의 회전각속도이다.

이동대차의 전체질량은 이동대차의 몸체질량(m_c), 두 바퀴 및 DC 모터의 두 회전자의 질량(m_w)을 포함하며 다음 식으로 표현된다.

$$m = m_c + 2m_w \quad (2-15)$$

이동대차의 전체 관성모멘트는 다음 식과 같이 표현된다.

$$I = I_c + 2m_c b^2 + 2I_m \quad (2-16)$$

여기서 I_c 는 이동대차의 관성모멘트, I_m 는 바퀴의 중심축을 지나는 수

직 축에 대한 바퀴 및 DC 모터의 회전자의 관성모멘트, $m_t b^2$ 는 바퀴와 DC 모터의 회전자의 관성모멘트가 이동로봇의 중심을 지나는 수직 축에 대해 정의될 때의 추가량이므로, 이축은 바퀴의 중심점을 지나는 수직 축과 평행하다.

한편 다음 식이 성립한다.

$$\begin{cases} v^2 = \dot{x}^2 + \dot{y}^2 \\ w^2 = \dot{\phi}^2 \\ w_{rw}^2 = \dot{\theta}_r^2 \\ w_{lw}^2 = \dot{\theta}_l^2 \end{cases} \quad (2-17)$$

식(2-17)을 식(2-14)에 대입하면, 다음 식이 구해진다.

$$K = \frac{1}{2} m (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + \frac{1}{2} I \dot{\phi}^2 + \frac{1}{2} I_w (\dot{\theta}_r + \dot{\theta}_l) \quad (2-18)$$

식(2-18)을 비홀로노믹 구속조건과 결합시키면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} K = & \frac{1}{2} m (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + \frac{1}{2} I \dot{\phi}^2 + \frac{1}{2} I_w (\dot{\theta}_r + \dot{\theta}_l) \\ & + m_c d \dot{\phi} (\dot{y} \cos \phi - \dot{x} \sin \phi) \end{aligned} \quad (2-19)$$

식(2-7)를 식(2-19)에 대입하여 정리하면 다음과 같이 표현된다.

$$K = \frac{1}{2} m \left(m + \frac{2I_w}{r^2} \right) (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + \frac{1}{2} \left(I + \frac{I_w}{2c^2} \right) \dot{\phi}^2 + mc\ddot{\phi}(\dot{y}\cos\phi - \dot{x}\sin\phi) \quad (2-20)$$

여기서 $c = \frac{r}{2b}$ 이다

비홀로노믹 이동로봇 시스템의 운동에 대한 라그란제 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial K}{\partial \dot{q}_i} + \frac{\partial K}{\partial q_i} = F_i - a_{1i}\lambda \quad (2-21)$$

여기서 q_i 는 라그란제 좌표, F_i 는 라그란제 힘, a_{1i} 는 식 (2-4)의 각 성분이며, λ 는 라그란제 multiplier이다.

식 (2-20)과 (2-21)로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \left(m + \frac{2I_w}{r^2} \right) \ddot{x} - m_c d (\ddot{\phi} \sin\phi + \dot{\phi}^2 \cos\phi) &= \frac{(\tau_r + \tau_l) \cos\phi}{r} - \lambda \sin\phi \\ \left(m + \frac{2I_w}{r^2} \right) \ddot{y} + m_c d (\ddot{\phi} \cos\phi - \dot{\phi}^2 \sin\phi) &= \frac{(\tau_r + \tau_l) \sin\phi}{r} + \lambda \cos\phi \\ m_c d (\ddot{y} \cos\phi - \ddot{x} \sin\phi) + \left(I + \frac{I_w}{2c^2} \right) \ddot{\phi} &= \frac{b}{r} (\tau_r - \tau_l) \end{aligned} \quad (2-22)$$

만일 이동대차의 기하학적 중심과 무게중심이 같고, 구동바퀴의 관성 모멘트가 매우 작아 무시할 수 있다고 가정하면 즉 $d = 0$, $I_w = 0$ 인 경우는 식(2-22)는 다음 식으로 표현된다.

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{u_1 \cos \phi}{mr} - \frac{\lambda}{m} \sin \phi = -\frac{\lambda}{m} \sin \phi + b_1 u_1 \cos \phi \\ \ddot{y} = \frac{u_1 \sin \phi}{mr} + \frac{\lambda}{m} \cos \phi = \frac{\lambda}{m} \cos \phi + b_1 u_1 \sin \phi \\ \ddot{\phi} = \frac{b}{Ir} u_2 = b_2 u_2 = \dot{w} \end{cases} \quad (2-23)$$

여기서, $b_1 = 1/(rm)$, $b_2 = b/(rI)$, m 과 I 는 각각 이동로봇의 질량과 관성모멘트이다. 또한 $u_1 = T_1 + T_2$ 과 $u_2 = T_1 - T_2$ 는 제어입력들이며, $\lambda = -m\dot{\phi}(\dot{x}\cos\phi + \dot{y}\sin\phi)$ 에서 λ 는 Lagrange multiplier이다. 여기서, 로봇의 질량, 관성모멘트, 바퀴직경과 기지의 부호를 지닌 뒷바퀴사이의 일정한 거리의 조합으로 표시되기 때문에 b_1 와 b_2 의 부호는 기지의 값으로 가정한다.

제 3 장

제어기 설계

3.1 서언

본장은 용접이동로봇의 속도와 목표 용접경로 추적을 위한 리아푸노프 안정성에 근거한 단순 비선형 제어기와 질량, 관성, 바퀴의 반경 및 뒷바퀴와 대차중심 사이의 거리등을 미지의 매개변수를 가질 때의 적응 제어기를 제시하였다. 시스템은 비홀로노믹 구속조건을 가지며, 두개의 바퀴를 가진 용접이동로봇의 대차와 슬라이더를 포함하는 3자유도를 가지고 있다. 토치슬라이더 운동은 용접속도가 매우 느리기 때문에 더욱 빠른 추적을 위해 사용된다. 제어책은 시스템의 점근적 안정성을 보증하기 위해 리아푸노프 제어함수를 근거로 하여 얻는다. 또한 각 제어기들의 유효성을 증명하기 위해 시뮬레이션 및 실험이 수행된다.

3.2 백스텝핑법을 이용한 비선형 제어기 설계

이륜구동 용접이동로봇의 속도와 목표 용접경로 추적을 위한 리아푸노프 안정성에 근거한 단순 비선형 제어기와 비선형 적응 제어기를 제시한다. 단순 비선형 제어기는 운동학적 모델과 동력학적 모델을 모두 고려하여 설계하였고, 비선형 적응 제어기는 동력학적 모델을 고려하여 설계하였다.

제어목적은 목표 용접속도로 용접점 W 가 목표점 R 을 추적하도록 제어기를 설계하는 것이다. 추적오차 $e = [e_1 \ e_2 \ e_3]^T$ 를 Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 정의한다.

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi & \sin\phi & 0 \\ -\sin\phi & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x_w \\ y_r - y_w \\ \phi_r - \phi_w \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

제어기는 목표 용접속도로 $t \rightarrow \infty$ 일 때 $e_i \rightarrow 0$ 이도록 설계하여 용접점 W 가 목표점 R 을 추적하도록 한다. 토치슬라이더가 제어되는 경우와 제어되지 않는 두 가지 경우를 고려한다.

고정 토치슬라이더인 경우, 토치는 용접 전에만 조정 가능하며 시스템에 좌우바퀴의 각속도 두 입력이 존재한다. 토치길이 l 이 일정($\dot{l} = 0$)할 때, 즉 고정토치 일 경우 방정식(2-12, 2-13, 3-1)로부터, 다음과 같은 오차의 도함수 $\dot{e}_i$ 가 얻어진다.

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \\ \dot{e}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_r \cos e_3 \\ v_r \cos e_3 \\ w_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 & e_2 + l \\ 0 & -e_1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

or

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = (e_2 + l)w - v + v_r \cos e_3 \\ \dot{e}_2 = -e_1 w + v_r \sin e_3 \\ \dot{e}_3 = w_r - w \end{cases} \quad (3-3)$$

Step 1. 운동학적 모델을 이용한 단순 비선형 제어기 설계
(Simple nonlinear kinematic controller design)

리아푸노프 함수를 다음과 같이 선택한다.

$$V_1 = \frac{1}{2} e_1^2 + \frac{1}{2} e_2^2 + \frac{1}{2} e_3^2 \geq 0 \quad (3-4)$$

V_1 의 도함수는 식(3-3)을 이용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= e_1 \dot{e}_1 + e_2 \dot{e}_2 + e_3 \dot{e}_3 \\ &= e_1 (-v + (e_2 + l)w + v_r \cos e_3) \\ &\quad + e_2 (-e_1 w + v_r \sin e_3) + e_3 (w_r - w) \\ &= e_1 (-v + lw + v_r \cos e_3) + e_2 (v_r \sin e_3) + e_3 (-w + w_r) \end{aligned} \quad (3-5)$$

$\dot{V} \leq 0$ 를 얻기 위해, 용접이동로봇의 대차 속도성분 v, w 를 방정식 (3-6)이 성립하도록 선택한다.

$$\rightarrow \begin{cases} -v + lw + v_r \cos e_3 = -k_1 e_1 & (a) \\ v_r \sin e_3 = -k_2 e_2 & (b) \\ w_r - w = -k_3 e_3 & (c) \end{cases} \quad (3-6)$$

식(3-6)으로부터 다음과 같은 제어칙이 얻어진다.

$$\begin{cases} (a) & \rightarrow v = v_r \cos e_3 + lw_d + k_1 e_2 \\ (b) + (c) & \rightarrow w = w_r + v_r \sin e_3 + k_2 e_2 + k_3 e_3 \end{cases} \quad (3-7)$$

식(3-6)을 식(3-5)에 대입하면 다음이 성립함을 알 수 있다.

$$\dot{V}_1 = -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 - k_3 e_3^2 \leq 0 \quad (3-8)$$

여기서, k_1, k_2 와 k_3 는 양의 상수들이다.

운동학적 모델을 이용한 단순 비선형 제어기는 완전 속도추적을 가정하므로 v_d, w_d 를 각각 목표 가상 추적속도와 목표 가상 추적각속도라 정의하면 $v = v_d, w = w_d$ 이다.

$$\begin{cases} v_d = v_r \cos e_3 + lw_d + k_1 e_2 \\ w_d = w_r + v_r \sin e_3 + k_2 e_2 + k_3 e_3 \end{cases} \quad (3-9)$$

식(2-7) 과 (3-7)로부터, 두 구동바퀴의 필요한 속도 w_{rw}, w_{lw} 를 계산할 수 있다.

Step 2. 동력학적 모델을 이용한 단순 비선형 제어기 설계

(Simple nonlinear dynamic controller design)

v 를 용접이동로봇의 가상 제어변수, v_d 를 목표 가상 제어변수라 하고 경로추적오차 $\mathbf{e}$ 는 점근 안정적으로 수렴한다고 가정한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해, $\tilde{v}, \tilde{w}$ 를 가상 제어오차로서 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{cases} \tilde{v} = v - v_d \\ \tilde{w} = w - w_d \end{cases} \quad (3-10)$$

$$v = \dot{x}\cos\phi + \dot{y}\sin\phi \quad (3-11)$$

용접이동로봇의 동력학적 모델식 (2-23)과 (3-11)로부터 v, w 의 도함수는 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} \dot{v} &= \ddot{x}\cos\phi - \dot{x}\sin\phi\dot{\phi} + \ddot{y}\sin\phi + \dot{y}\cos\phi\dot{\phi} \\ &= \left(-\frac{\lambda}{m}\sin\phi + b_1u\cos\phi\right)\cos\phi - \dot{x}\sin\phi\dot{\phi} \\ &\quad + \left(\frac{\lambda}{m}\cos\phi + b_1u_1\sin\phi\right)\sin\phi + \dot{y}\cos\phi\dot{\phi} \\ &= \frac{\lambda}{m}\sin\phi\cos\phi + b_1u\cos^2\phi - \dot{x}\sin\phi\dot{\phi} \\ &\quad - \frac{\lambda}{m}\cos\phi\sin\phi + b_1u_1\sin^2\phi + \dot{y}\cos\phi\dot{\phi} \\ &= b_1u_1 - (\dot{x}\sin\phi - \dot{y}\cos\phi)\dot{\phi} \\ &= b_1u_1 \end{aligned} \quad (3-12)$$

Note : $(\dot{x}\sin\phi - \dot{y}\cos\phi) = 0$ (*nonholonomic*)

$$\dot{w} = \ddot{\phi} = b_2 u_2 \quad (3-13)$$

식(3-10), (3-12), (3-13)으로부터 $\tilde{v}$, $\tilde{w}$ 의 도함수는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{cases} \dot{\tilde{v}} = \dot{v} - \dot{v}_d = b_1 u_1 - \dot{v}_d \\ \dot{\tilde{w}} = \dot{w} - \dot{w}_d = b_2 u_2 - \dot{w}_d \end{cases} \quad (3-14)$$

식(3-5)과 (3-10)을 사용하면, 다음 식이 유도된다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= e_1(-v_d - \tilde{v} + l(w_d + \tilde{w}) + v_r \cos e_3) \\ &\quad + e_2(v_r \sin e_3) + e_3(w_r - w_d - \tilde{w}) \\ &= e_1(-v_d + l w_d + v_r \cos e_3) + e_2(v_r \sin e_3) \\ &\quad + e_3(w_r - w_d) - \tilde{v} e_1 - \tilde{w}(e_3 - e_1 l) \\ &= -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 - k_3 e_3^2 - \tilde{v} e_1 - \tilde{w}(e_3 - e_1 l) \end{aligned} \quad (3-15)$$

식(3-15)는 항상 음의 값을 갖는다는 보장이 없으므로 다음과 같이 새로운 리아푸노프 함수를 정의한다.

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} \tilde{v}^2 + \frac{1}{2} \tilde{w}^2 \quad (3-16)$$

V_2 의 도함수는 식(3-14), (3-15), (3-16)을 사용하여 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned}
\dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + \tilde{v}\dot{\tilde{v}} + \tilde{w}\dot{\tilde{w}} \\
&= -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 - k_3 e_3^2 + \tilde{v}(\dot{\tilde{v}} - e_1) + \tilde{w}(\dot{\tilde{w}} - e_3 + e_1 e) \\
&= -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 - k_3 e_3^2 + \tilde{v}(b_1 u_1 - \dot{v}_d - e_1) \\
&\quad + \tilde{w}(b_2 u_2 - \dot{w}_d - e_3 + e_1 l)
\end{aligned} \tag{3-17}$$

식(3-17)은 다음 식을 선택하면 식(3-19)가 항상 성립한다.

$$\begin{cases} b_1 u_1 - \dot{v}_d - e_1 = -c_1 \tilde{v} \\ b_2 u_2 - \dot{w}_d - e_3 + e_1 l = -c_2 \tilde{w} \end{cases} \quad (c_1, c_2, \text{는 양수}) \tag{3-18}$$

$$\dot{V}_2 = -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 - k_3 e_3^2 - c_1 \tilde{v}^2 - c_2 \tilde{w}^2 \leq 0 \tag{3-19}$$

식(3-18)을 정리하면, 동력학적 속도 제어칙 (3-20)이 얻어진다.

$$\begin{cases} u_1 = \frac{-c_1 \tilde{v} + \dot{v}_d + e_1}{b_1} \\ u_2 = \frac{-c_2 \tilde{w} + \dot{w}_d + e_3 - e_1 l}{b_2} \end{cases} \tag{3-20}$$

Step3. 비선형 적응 제어기 설계

(Nonlinear adaptive controller design)

r, m, b, I 가 미지인 경우, 즉 $\beta_1 = \frac{1}{b_1} = rm, \beta_2 = \frac{1}{b_2} = \frac{r}{b}I$ 의 값이

미지일 경우에는 β_1, β_2 를 추정하기 위하여 다음과 같이 적응 제어기의 설계가 필요하다.

리아푸노프 후보함수를 다음과 같이 선택한다.

$$\beta_1 = \frac{1}{b_1} = rm, \quad \beta_2 = \frac{1}{b_2} = \frac{r}{b}I \text{에서,}$$

$$V_3 = V_1 + \frac{1}{2}(\tilde{v}^2 + \tilde{w}^2) + \frac{|b_1|}{2\gamma_1}\tilde{\beta}_1^2 + \frac{|b_2|}{2\gamma_2}\tilde{\beta}_2^2 \quad (3-21)$$

여기서,

$$\begin{cases} \tilde{\beta}_1 = \beta_1 - \hat{\beta}_1 = \frac{1}{b_1} - \hat{\beta}_1 \rightarrow \dot{\tilde{\beta}}_1 = -\dot{\hat{\beta}}_1 \\ \tilde{\beta}_2 = \beta_2 - \hat{\beta}_2 = \frac{1}{b_2} - \hat{\beta}_2 \rightarrow \dot{\tilde{\beta}}_2 = -\dot{\hat{\beta}}_2 \end{cases} \quad (3-22)$$

이다.

또한, V_3 의 시간도함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
\dot{V}_3 &= \dot{V}_1 + \dot{\tilde{v}}\tilde{v} + \dot{\tilde{w}}\tilde{w} + \frac{|b_1|}{\gamma_1}\tilde{\beta}_1\dot{\tilde{\beta}}_1 + \frac{|b_2|}{\gamma_2}\tilde{\beta}_2\dot{\tilde{\beta}}_2 \\
&= -k_1e_1^2 - k_2e_2^2 - k_3e_3^2 - \tilde{v}e_1 - \tilde{w}(e_3 - e_1l) + \tilde{v}(b_1u_1 - \dot{v}_d) \\
&\quad + \tilde{w}(b_2u_2 - \dot{w}_d) - \frac{|b_1|}{\gamma_1}\tilde{\beta}_1\dot{\tilde{\beta}}_1 - \frac{|b_2|}{\gamma_2}\tilde{\beta}_2\dot{\tilde{\beta}}_2 \\
&= -k_1e_1^2 - k_2e_2^2 - k_3e_3^2 - \tilde{v}e_1 - \tilde{w}(e_3 - e_1l) \\
&\quad + \tilde{v}\left(\frac{u_1}{\hat{\beta}_1} - \frac{u_1}{\hat{\beta}_1} + b_1u_1 - \dot{v}_d\right) \\
&\quad + \tilde{w}\left(\frac{u_2}{\hat{\beta}_2} - \frac{u_2}{\hat{\beta}_2} + b_2u_2 - \dot{w}_d\right) - \frac{|b_1|}{\gamma_1}\tilde{\beta}_1\dot{\tilde{\beta}}_1 - \frac{|b_2|}{\gamma_2}\tilde{\beta}_2\dot{\tilde{\beta}}_2 \\
&= -k_1e_1^2 - k_2e_2^2 - k_3e_3^2 + \tilde{v}\left(-e_1 + \frac{u_1}{\hat{\beta}_1} - \dot{v}_d\right) + \tilde{v}\left(-\frac{u_1}{\hat{\beta}_1} + \frac{u_1}{\beta_1}\right) \\
&\quad + \tilde{w}\left[-(e_3 - e_1l) + \frac{u_2}{\hat{\beta}_2} - \dot{w}_d\right] \\
&\quad + \tilde{w}\left(-\frac{u_2}{\hat{\beta}_2} + \frac{u_2}{\beta_2}\right) - \frac{|b_1|}{\gamma_1}\tilde{\beta}_1\dot{\tilde{\beta}}_1 - \frac{|b_2|}{\gamma_2}\tilde{\beta}_2\dot{\tilde{\beta}}_2 \\
&= -k_1e_1^2 - k_2e_2^2 - k_3e_3^2 + \tilde{v}\left(-e_1 + \frac{u_1}{\hat{\beta}_1} - \dot{v}_d\right) \\
&\quad + \tilde{w}\left[-(e_3 - e_1l) + \frac{u_2}{\hat{\beta}_2} - \dot{w}_d\right] \\
&\quad + \tilde{v}u_1b_1\left(-\frac{\tilde{\beta}_1}{\hat{\beta}_1}\right) - \frac{|b_1|}{\gamma_1}\tilde{\beta}_1\dot{\tilde{\beta}}_1 + \tilde{w}u_2b_2\left(-\frac{\tilde{\beta}_2}{\hat{\beta}_2}\right) - \frac{|b_2|}{\gamma_2}\tilde{\beta}_2\dot{\tilde{\beta}}_2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 - k_3 e_3^2 + \tilde{v} \left(-e_1 + \frac{u_1}{\hat{\beta}_1} - \dot{v}_d \right) \\
&\quad + \tilde{w} \left[- (e_3 - e_1 l) + \frac{u_2}{\hat{\beta}_2} - \dot{w}_d \right] \\
&\quad + \frac{\tilde{\beta}_1 |b_1|}{\gamma_1} \left(-\gamma_1 \tilde{v} \text{sign}(b_1) \frac{u_1}{\hat{\beta}_1} - \dot{\hat{\beta}}_1 \right) \\
&\quad + \frac{\tilde{\beta}_2 |b_2|}{\gamma_2} \left(-\gamma_2 \tilde{w} \text{sign}(b_2) \frac{u_2}{\hat{\beta}_2} - \dot{\hat{\beta}}_2 \right)
\end{aligned} \tag{3-23}$$

$\dot{V}_3 \leq 0$ 를 얻기 위하여, 적응 제어칙(adaptive control law)을 다음과 같이 선택한다.

$$\left\{ \begin{aligned}
(-e_1 - \dot{v}_d + \frac{u_1}{\hat{\beta}_1}) &= -c_1 \tilde{v} \\
(-(e_3 - e_1 l) + \frac{u_2}{\hat{\beta}_2} - \dot{w}_d) &= -c_2 \tilde{w} \\
(-\gamma_1 \tilde{v} \text{sign}(b_1) \frac{u_1}{\hat{\beta}_1} - \dot{\hat{\beta}}_1) &= 0 \\
(-\gamma_2 \tilde{w} \text{sign}(b_2) \frac{u_2}{\hat{\beta}_2} - \dot{\hat{\beta}}_2) &= 0
\end{aligned} \right. \tag{3-24}$$

$$\rightarrow \left\{ \begin{aligned}
u_1 &= \hat{\beta}_1 (-c_1 \tilde{v} + e_1 + \dot{v}_d) \\
u_2 &= \hat{\beta}_2 (-c_2 \tilde{w} + (e_3 - e_1 l) + \dot{w}_d) \\
\dot{\hat{\beta}}_1 &= -\gamma_1 \tilde{v} \text{sign}(b_1) \frac{u_1}{\hat{\beta}_1} \\
\dot{\hat{\beta}}_2 &= -\gamma_2 \tilde{w} \text{sign}(b_2) \frac{u_2}{\hat{\beta}_2}
\end{aligned} \right. \tag{3-25}$$

$$\rightarrow \begin{cases} u_1 = \hat{\beta}_1(-c_1\tilde{v} + e_1 + \dot{v}_d) \\ u_2 = \hat{\beta}_2(-c_2\tilde{w} + (e_3 - e_1l) + \dot{w}_d) \\ \dot{\hat{\beta}}_1 = -\gamma\tilde{v}sign(b_1)(-c_1\tilde{v} + e_1 + \dot{v}_d) \\ \dot{\hat{\beta}}_2 = -\gamma\tilde{w}sign(b_2)(-c_2\tilde{w} + (e_3 - e_1l) + \dot{w}_d) \end{cases} \quad (3-26)$$

식(3-24)를 (3-23)에 대입하면 다음 식이 얻어진다.

$$\dot{V}_3 = -k_1e_1^2 - k_2e_2^2 - k_3e_3^2 - c_1\dot{v}^2 - c_2\dot{w}^2 \leq 0 \quad (3-27)$$

식(3-21)과 (3-27)로부터, $V_3, e_1, e_2, e_3, \tilde{v}, \tilde{w}, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2$ 는 모두 유한경계치 내에서 변동하게 된다.

$\ddot{V}_3$ 는 다음 식으로 얻어진다.

$$\begin{aligned} \ddot{V}_3 &= 2k_1e_1\dot{e}_1 - 2k_2e_2\dot{e}_2 - 2k_3e_3\dot{e}_3 - 2c_1\tilde{v}\dot{\tilde{v}} - 2c_2\tilde{w}\dot{\tilde{w}} \\ &= -2k_1e_1[(e_2 + l)w - v + v_r\cos e_3] \\ &\quad - 2k_2e_2(-e_1w + v_r\sin e_3) - 2k_3e_3(w_r - w) \\ &\quad - 2k_3e_3(w_r - w) - 2c_1\tilde{v}(b_1u_1 - \dot{v}_d) - 2c_2\tilde{w}(b_2u_2 - \dot{w}_d) \\ &= -k_1e_1[(e_2 + l)(w_d + \tilde{w}) - (v_d + \tilde{v}) + v_r\cos e_3] \\ &\quad - 2k_2e_2[-e_1(w_d + \tilde{w}) + v_r\sin e_3] \\ &\quad - 2k_3e_3[w_r - (w_d + \tilde{w})] \\ &\quad - 2c_1\tilde{v}[b_1\hat{\beta}_1(-c_1\tilde{v} + e_1 + \dot{v}_d) - \dot{v}_d] \\ &\quad - 2c_2\tilde{w}[b_2\hat{\beta}_2(-c_2\tilde{w} + \frac{1}{k_2}\sin e_3 + \dot{w}_d) - \dot{w}_d] \end{aligned} \quad (3-28)$$

여기서, k_1 은 양의 상수, k_2 와 k_3 는 $R \times R - (0,0)$ 위에서 엄밀하게 양수이다. $\ddot{V}_3$ 는 유한 경계치 내에서 변동하는 1계 도함수를 가지는 유한 경계치 내에서 변동하는 연속함수이고, v , r 과 그들 각각의 도함수는 모두 유한 경계치 내에서 변동한다. 따라서 $\dot{V}_3$ 는 균일 연속이다. $V_3(t)$ 가 미분가능하고 일정한 값에 수렴하면 $\ddot{V}_3$ 가 유한경계치 내에서 변동하기 때문에, Barbalat's lemma에 의해, $t \rightarrow \infty$ 일 때 $\dot{V}_3(t) \rightarrow 0$ 이다. 따라서 $e_1, e_2, e_3, \tilde{v}$ 와 $\tilde{w}$ 는 모두 영에 수렴한다.

제 4 장

용접이동로봇의 구성

4.1 오차측정용 센서설계

용접이동로봇의 제어문제에 있어서, 로봇작동을 위한 환경정보는 매우 중요하다. 환경정보에는 기지환경과 미지환경 두 형태의 환경이 존재하며 본 연구에서는 기지환경이 적용되었다. 용접이동로봇은 격자형 용접을 하기위해 미지의 완전한 곡선형태를 가지는 강으로 된 벽을 추종한다. 용접이동로봇이 작동하는 동안, 용접이동로봇 주위의 자유공간을 결정할 필요가 있다. 그 후, 용접이동로봇은 작업경로에 상대적인 공간에 위치되어야한다. 본 연구에서는 제어기가 추적오차를 측정하는 것에 기반하고 있다. 그러므로 추적오차 성분의 측정가능성은 매우 중요하다. 오차를 측정하기 위해 사용되는 센서는 형태에 의존하는 몇몇 방법이 있다. 오차의 제한된 측정가능성이 있을 때, 관측기가 Leferber에 의해 사용된다.[14]

제어기(3-9), (3-20), (3-26)을 얻기 위해, 오차 e_1, e_2, e_3 가 측정된다. Fig. 3은 포텐서미터를 사용한 오차값을 얻기 위해 간단한 측정계획법을 제안한다. 두개의 물러는 점 O_1, O_2 에 위치된다. 두 물러 O_1, O_2 사이의 거리는 $\vec{v}_r \parallel \overline{O_1 O_2}$ 이 되도록 접촉점 $R(x_r, y_r)$ 에서 목표 용접경로의 곡선반경에 따라 선택된다. 두 물러직경은 마찰력을 극복하기 위해 충분히 작게 선택한다.

Fig. 3에서, 다음 관계식이 얻어진다.

$$\begin{cases} e_1 = -r_s \sin e_3 \\ e_2 = (l_s - l) - r_s(1 - \cos e_3) \\ e_3 = \angle(O_1 C, O_1 O_2) - \pi/2 \end{cases} \quad (4-1)$$

여기서, r_s 는 롤러의 반경이며, l_s 는 센서의 길이이다. 따라서 오차를 측정하기 위해 $(l_s - l)$ 의 측정용 선형 센서와 용접이동로봇의 X좌표와 $\vec{v_r}$ 사이의 각을 측정하기 위한 회전센서가 필요하다. 만일 경로가 직선이면, 측정 잡음을 제외한 어떠한 측정오차도 없다. 또한 경로가 곡선이면, 추적오차를 측정하기 위해 위의 방법이 사용될 때 측정오차가 존재한다. 이 오차는 롤러반경 r_s , 센서의 길이 l_s 와 O_1, O_2 의 길이에 의존한다. 이 오차의 통괄성능으로서의 효과는 다음 절의 시뮬레이션에서 보여주는 바와 같이 받아들일 수 있다.

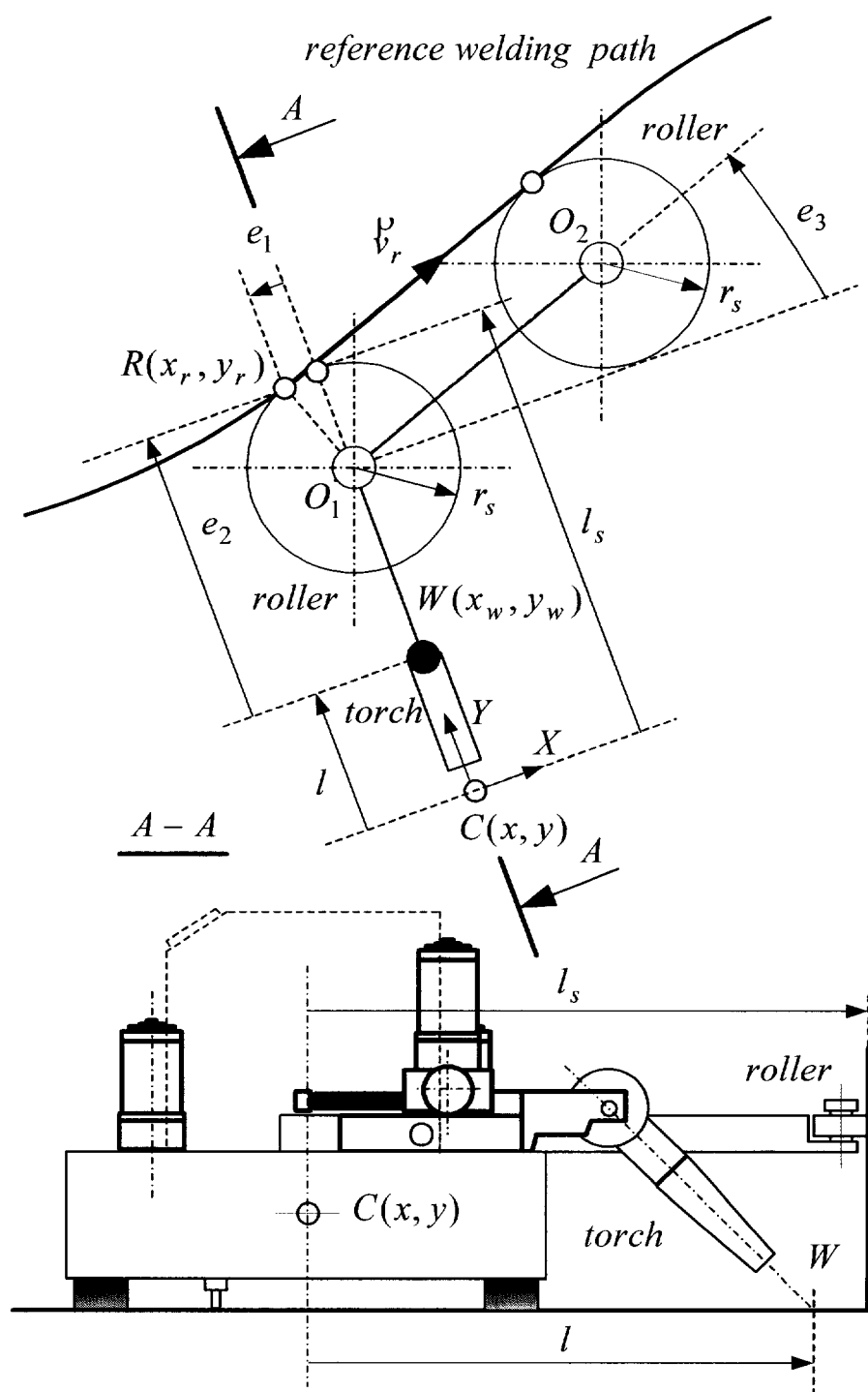


Fig. 3 Scheme for measuring the errors

4.2 통괄제어시스템의 하드웨어

제어기는 특별한 제어를 수행하기 위한 기능으로 모듈화 되어있다. 제어기는 서보DC모터 제어기용 2개와 주제어기용 1개 등 총 3개의 PIC18F452 마이크로 컨트롤러 통합에 기반하고 있다. 2개의 서보제어기는 각각 한 개의 엔코더를 사용하여 간접적인 서보제어를 수행할 수 있다. 마스터로서 기능하는 주제어기는 슬레이브 역할을 하는 2개의 서보제어기와 I2C통신을 통해 연결한다. 주제어기의 A/D포트는 오차를 감지하는 두개의 포텐서미터에 연결된다. 통괄제어시스템은 Fig. 4에 나타나 있다.

주제어기는 오차를 측정하기 위해 센서로부터 신호를 받은 후 제어칙이 샘플링시간 10ms동안의 오차를 기반으로 하여 만들어진다. 그리고, 각각 I2C통신을 통해 두 개의 서보제어기로 결과신호를 보낸다.

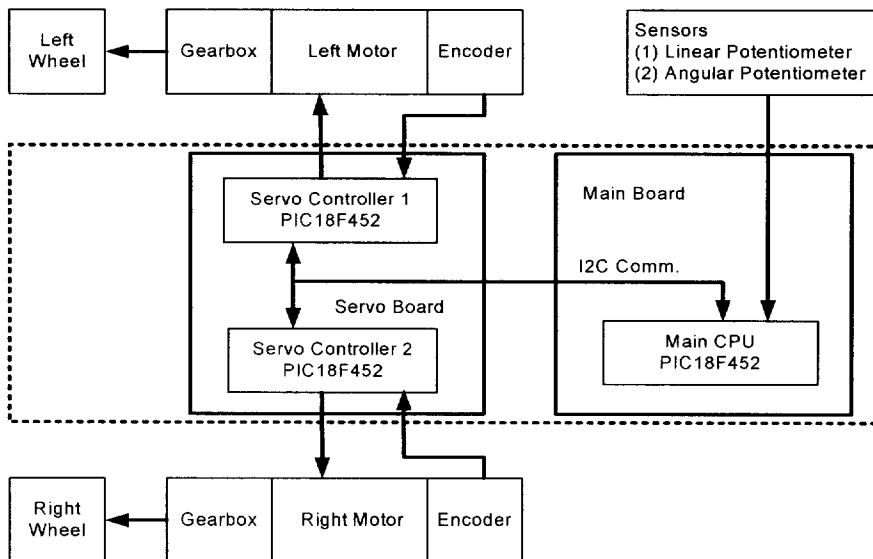
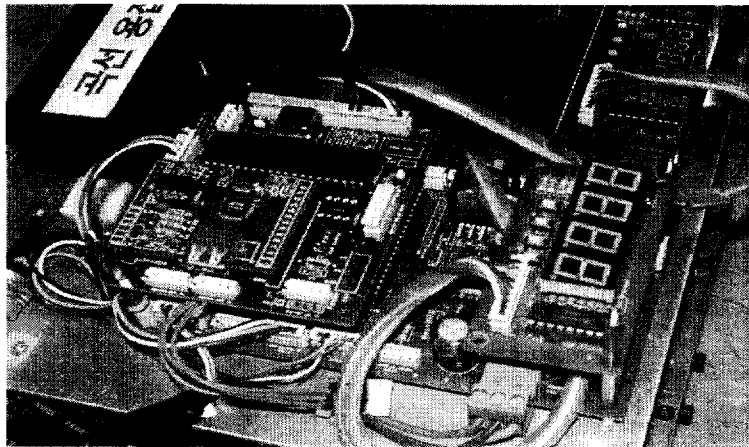
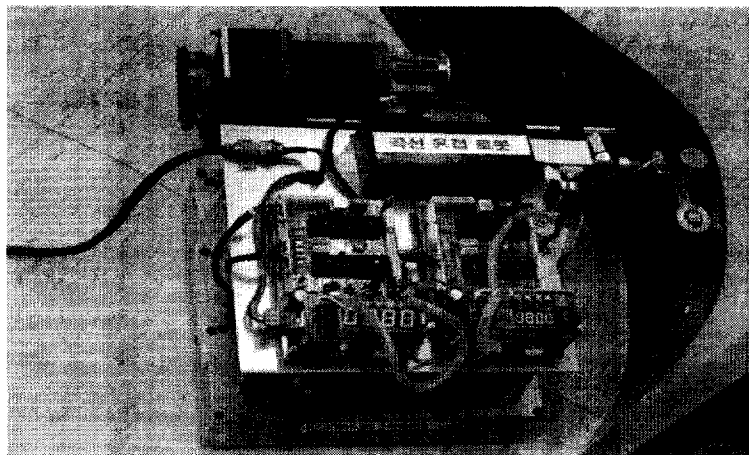


Fig. 4 Configuration of the control system

실험용 용접이동로봇은 Photo. 1에서 보여주고 있다. (a)는 본 논문에 사용된 용접이동로봇에 장착된 제어시스템을 나타내며 (b)는 Bui등이 사용한 용접이동로봇의 제어시스템을 나타낸다[1]. Bui등은 PIC16F877 마이크로 컨트롤러 4개를 사용한 반면에 본 논문에서는 3개의 PIC18F452 마이크로 컨트롤러를 사용하였다.



(a) For this thesis



(b) For Bui's thesis

Photo. 1 Experimental welding mobile robot

제 5 장

시물레이션 및 실험결과

5.1 서언

이 장은 백스텝핑법에 의한 단순 비선형 제어기와 시스템이 미지의 매개변수가 존재하더라도 시스템을 안정화 시키는 적응 제어기를 제시하였다. Bui 등은 첫째, 시스템의 관성모멘트, 용접이동로봇의 질량 중심에서 기하학적 중심 간의 거리가 미지이고 가변토치일 경우, 이러한 미지의 매개변수를 가지는 동력학적 모델을 이용하여, 시스템을 안정화 시키는 적응 제어기를 제시하였다[1], 둘째, 용접이동로봇의 뒷바퀴반경과 용접이동로봇의 대차중심과 뒷바퀴사이의 거리가 미지이고, 토치길이 가변일 경우, 운동학적 모델(Kinematic model)을 이용하여 시스템을 안정화 시키는 적응 제어기를 제시하고[1]. 제시된 적응 제어기의 유효성을 검증하기 위하여 시물레이션 및 실험을 수행하고, Bui등의 실험 및 시물레이션결과와 비교 평가하였다

본 논문은 백스텝핑법에 의해 운동학적 모델과 동력학적 모델을 이용하여 시스템을 안정화 시키는 단순 비선형 제어기와 시스템질량, 바퀴반경, 시스템의 관성모멘트 및 용접이동로봇의 중심에서 뒷바퀴사이의 거리가 모두 미지인 경우 운동학적 모델을 이용하여 시스템을 안정화 시키는 적응 제어기를 제시하고 제시된 적응 제어기의 유효성을 검증하기 위하여 시물레이션 및 실험을 수행하였다.

Bui등이 제시한 적응 제어기와 본 연구에서 제시한 적응 제어기의 차이점은 본 연구의 적응 제어기는 시스템질량, 바퀴반경, 시스템의 관성모멘트 및 용접이동로봇의 중심에서 뒷바퀴사이의 거리를 병합한 것을

매개변수로 한 적응 제어기이며, Bui등의 적응 제어기는 시스템질량, 시스템의 관성모멘트, 용접이동로봇의 중량 중심에서 기하학적 중심 간의 거리를 병합한 경우와 뒷 바퀴반경과 용접이동로봇의 대차 중심에서 뒷바퀴사이의 거리를 병합한 경우 2가지를 별도로 분리하여 이들을 미지의 매개변수로 한 적응 제어기이다.

정의된 목표 용접경로를 가지는 용접이동로봇을 위해 제시된 모델링과 제어기들의 유효성을 증명하기 위해 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다. 즉 목표용접속도 7.5 mm/s로 Fig. 5와 같이 미리 정의된 완만한 목표 용접경로를 추적하기 위해 제시된 비선형 적응 제어기에 대해 시뮬레이션 및 실험결과를 보여준다.

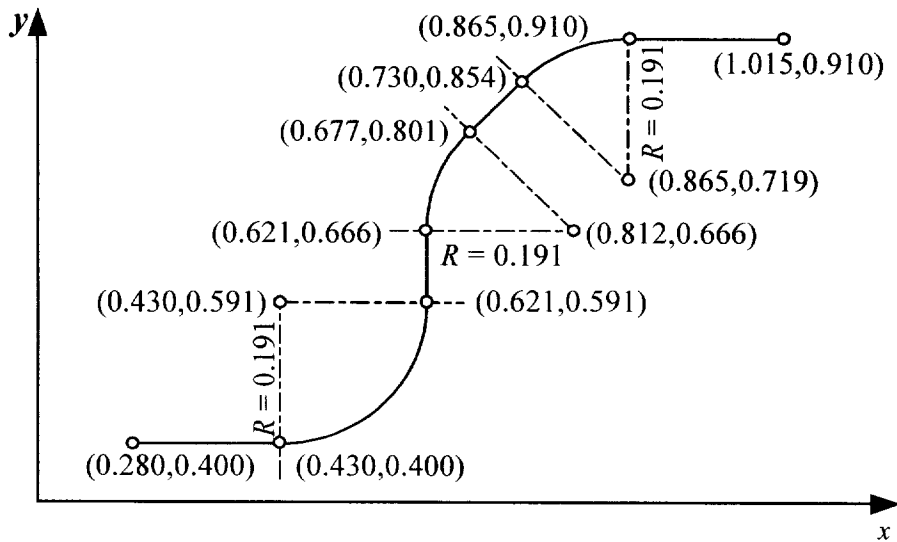


Fig. 5 Reference welding path

5.2 백스텝핑법을 이용한 단순 비선형 제어기의 시뮬레이션 및 실험결과

이 절은 백스텝핑법에 근거하여 운동학적 모델과 동력학적 모델을 이용하여 설계된 단순 비선형 운동학적 제어기 및 동력학적 제어기들의 유효성을 검증하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 목표 용접속도 (v_r)는 7.5mm/s로 하여 미리 정의된 완만한 목표 용접경로를 추적하기 위해 제시된 단순 비선형 제어기에 대해 시뮬레이션 및 실험결과를 보여준다.

상수매개변수는 $c_1 = 0.3$, $c_2 = 1$, $k_1 = 5$, $k_2 = 50$, $k_3 = 1.5$ 이다. 시뮬레이션을 위한 용접이동로봇의 초기값은 Table 2에 주어진다.

Table 1. Initial values for the simulation and experiment

<i>Parameters</i>	<i>Values</i>	<i>Unit</i>
x_r	0.28	<i>m</i>
x_w	0.270	<i>m</i>
y_r	0.4	<i>m</i>
y_w	0.396	<i>m</i>
ϕ_r	15	<i>deg.</i>
ϕ_w	0	<i>rad/s</i>
v	0	<i>m/s</i>
ω	0	<i>rad/s</i>
l	0.24	<i>m</i>
b	0.105	<i>m</i>
r	0.025	<i>m</i>
d	0	<i>m</i>
m_c	8.5	<i>kg</i>
m_w	0.3	<i>kg</i>
I_c	0.2081	<i>kgm²</i>
I_w	0	<i>kgm²</i>
I_m	4.96×10^{-4}	<i>kgm²</i>

시뮬레이션 결과는 Figs. 6-12에 주어진다. Fig. 6에서, 고정토치에서도 모든 오차가 7초 후에 영으로 가는 것이 보인다. Fig. 7은 목표 가상추적속도 v_d 와 실제속도 v 의 시뮬레이션결과를 보여주며 10초 후에는 실제 속도와 목표 가상 추적속도 v_d 가 목표 용접속도 7mm/s에 잘 추적하고 있으나 20초 후에는 목표 용접속도(v_r)보다 더 빠르게 서로 추적하고 있음을 보여준다. Fig. 8은 목표 가상 추적각속도 w_d 와 실제 각속도 w 의 시뮬레이션결과를 보여주며 10초 후에는 실제 각속도 w 는 목표 가상 추적각속도 w_d 에 잘 추적하고 있음을 보여준다. 내부 상태값의 선형속도 및 각속도 오차인 가상 제어오차 $\tilde{v}, \tilde{w}$ 는 Fig. 9에서 나타난 바와 같이 10초 후에 영으로 접근한다.

가상 제어입력벡터 $\mathbf{u} = [u_1 \ u_2]^T$ 는 Fig. 10에 보이며 이것으로 토크를 계산한다. Fig. 11는 이동로봇의 실제 제어입력인 좌우바퀴의 토크를 보여주며, 가상 제어입력과 토크는 5초 후에 좌우 바퀴가 일치하며, 20초에서 크게 변동하며 다시 안정함을 보이고 있다. Fig. 12는 좌우바퀴의 회전수(rpm)를 나타내며, 초기는 좌측바퀴가 우측바퀴보다 크다가 좌우바퀴의 회전수는 10초 근처에서 일치하며, 20초에서는 우측바퀴가 좌측바퀴보다 큼을 알 수 있다. 이것은 이동로봇이 초기 자세교정에 이어 직진한 후 20초에서 좌회전함을 보인다.

시뮬레이션결과로부터, 추적오차는 고정토치의 경우에도 단순비선형 제어기의 유효성을 보여준다. 이동로봇의 실제 속도는 목표 속도에 잘 추적함을 보여준다. 그러나 20초 후에는 용접이동로봇이 목표 경로를 따라 좌회전함에 따라 목표가상 추적속도 및 실제 속도가 목표 용접속도보다 더 빠르게 서로 추적하고 있음을 보여 준다.

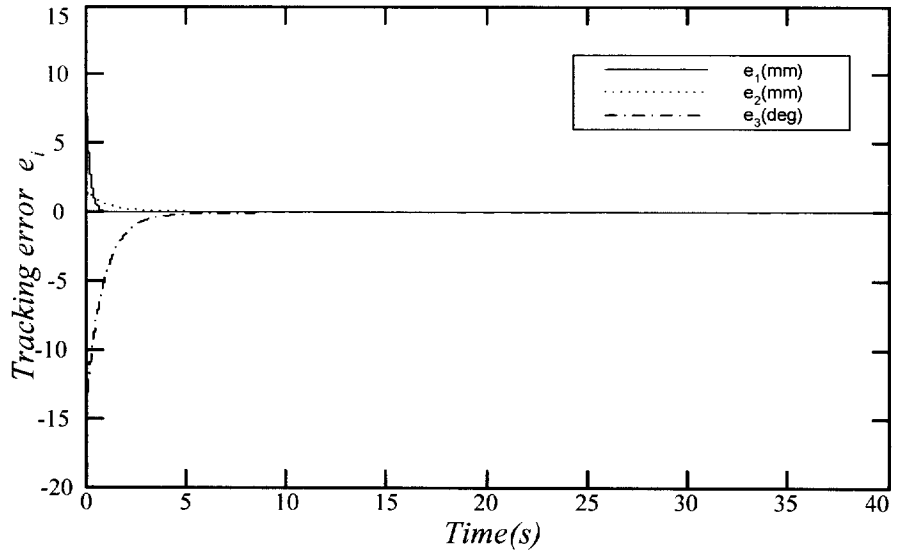


Fig. 6 Tracking errors

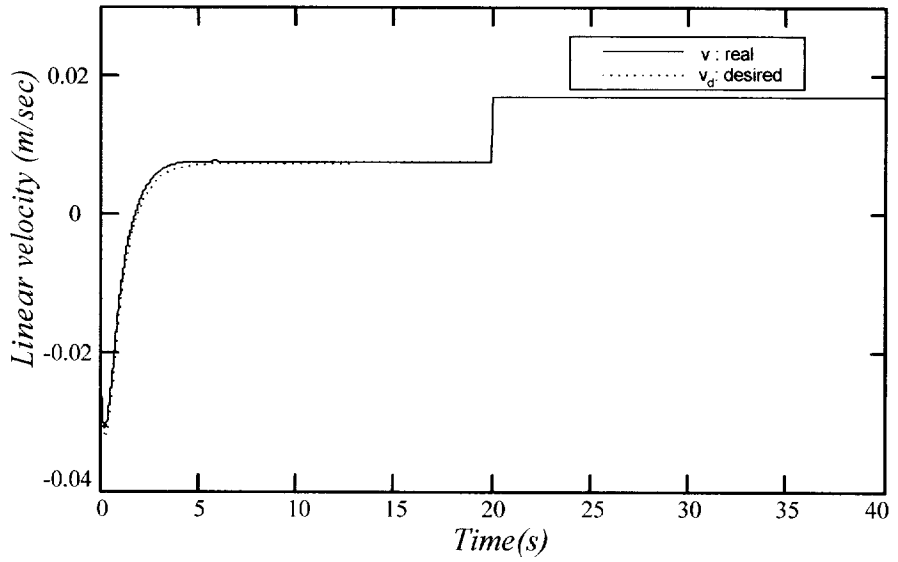


Fig. 7 Linear velocity

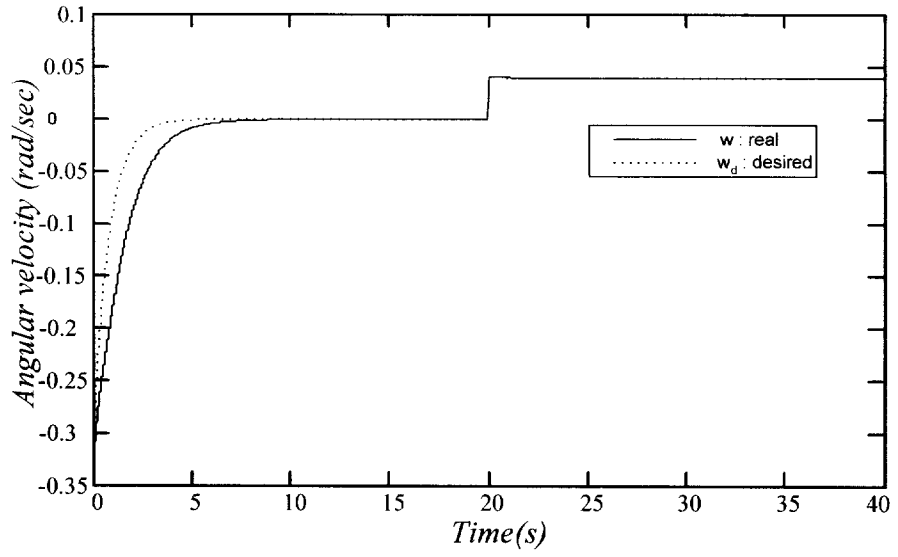


Fig. 8 Angular velocity

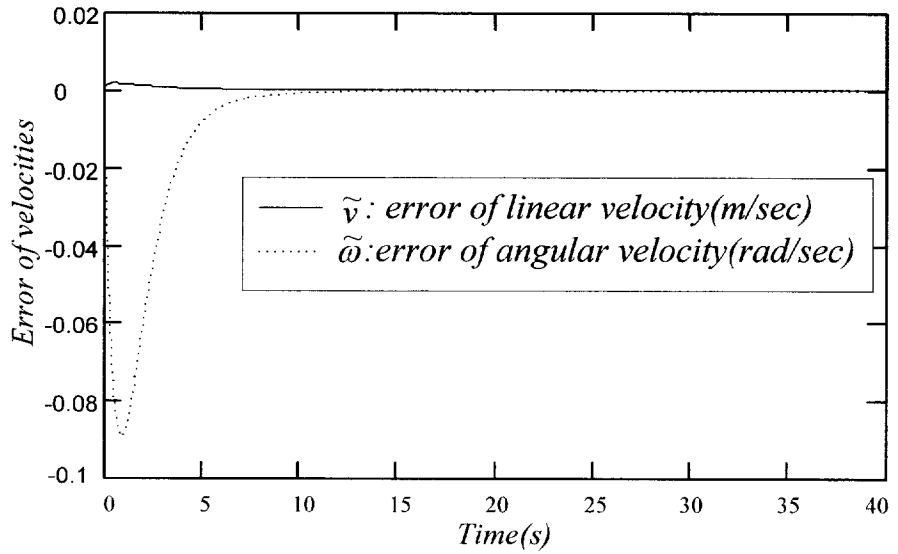


Fig. 9 Errors of linear velocity and angular velocity

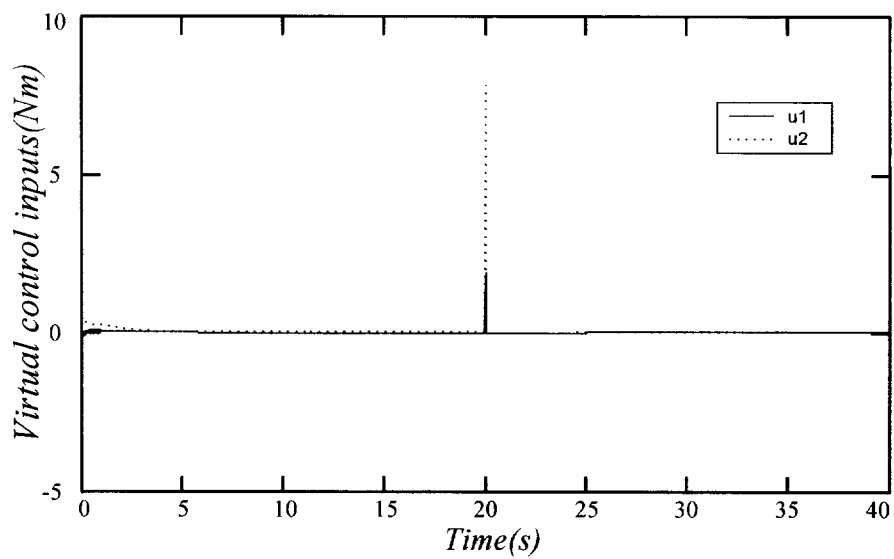


Fig. 10 Virtual Control input

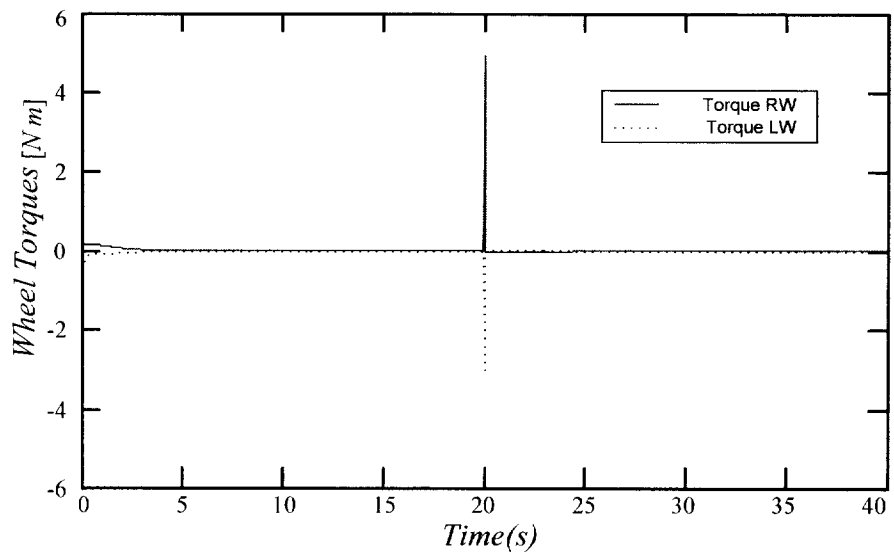


Fig.11 Wheel Torque

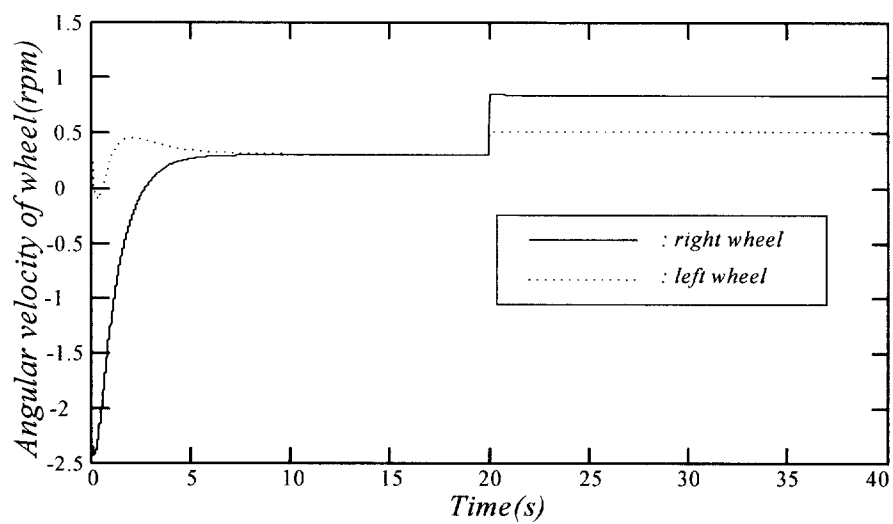


Fig. 12 Rotational velocity

5.3 비선형 적응제어기 시뮬레이션 및 실험결과

이 절은 시스템질량, 바퀴반경, 시스템의 관성모멘트 및 용접이동로봇의 중심에서 뒷바퀴 사이의 거리가 모두 미지인 경우 운동학적 모델을 이용하여 시스템을 안정화 시키는 적응 제어기를 제시하고, 제시된 적응 제어기의 유효성을 검증하기 위하여 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다. 목표 용접속도(v_r)는 7.5 mm/s로 하여 미리 정의된 완만한 목표 용접경로를 추적하기 위해 제시된 비선형 적응 제어기에 대해 시뮬레이션 및 실험결과를 보여준다. $\hat{\beta}_1$ 는 $\beta_1 = \frac{1}{b_1} = rm$ 의 추정치이며, $\hat{\beta}_2$ 는 $\beta_2 = \frac{1}{b_2} = \frac{rI}{b}$ 의 추정치이다. 시뮬레이션과 실험에 사용된 그 외 매개변수 및 초기값은 Table 2와 같다.

상수매개변수는 $c_1 = c_2 = 50, \gamma_1 = \gamma_2 = 10, k_1 = 3.55, k_2 = 50, k_3 = 1.3$ 와 $b = 0.25m$ 로 선택된다. 용접이동로봇의 운동매개변수는 $b_1 = b_2 = 0.5$ 로 선택되며, 이것은 미지이지만 기지의 부호로 가정한다.

시뮬레이션 및 실험결과는 Figs. 13-25에 주어진다. Fig. 13에서, 고정토크에서도 5초 후에 오차가 영으로 가는 것이 보인다. Figs. 14-16은 각각 추적오차 e_1, e_2, e_3 의 시뮬레이션 및 실험결과이며, (a)는 필터링하지 않는 경우이며, (b)는 Butterworth 필터로 필터링한 결과를 각각 보여준다. 이 Butterworth 필터는 좀 더 부드러운 신호를 얻기 위해 사용되었다. 이들 시험결과는 e_1, e_2 는 3초, e_3 는 5초 후에 시뮬레이션 결과를 잘 추적하고 있음을 보여준다. 미지의 매개변수 β_1, β_2 의 추정값 $\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2$ 의 시뮬레이션결과는 Figs. 17과 18이 보여준다. 즉 β_1, β_2 의 추정값 $\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2$ 의 빠른 안정성은 추적오차, 속도오차를 더욱 빠르게 줄여 빠른 추적성

능을 보여준다.

Fig. 19의 (a)는 초기시간동안, (b)는 전체 시간동안의 목표 가상추적 속도 v_d 와 실제속도 v 의 시뮬레이션 결과를 보여주며 1초 후 실제속도는 목표 가상 추적속도 v_d 에 잘 추적하고 있으며 또한 목표 용접속도 $v_r = 7mm/s$ 에 잘 추적하고 있음을 보여준다. 그러나 20초 이후 이들 속도는 실제 용접속도 v_r 보다 빠르게 추적하고 있음을 보여준다. 내부 상태 값의 속도오차인 가상 제어오차 $\tilde{v}, \tilde{w}$ 는 Fig. 20에서 나타난 바와 같이 1초 후에 거의 영으로 접근한다. Fig. 21의 (a)는 초기시간동안, (b)는 전체 시간동안의 목표 가상 추적각속도 w_d 와 실제 회전각속도 w 의 시뮬레이션 결과를 보여주며 1초 후 실제 각속도 w 는 목표 가상추적 각속도 w_d 에 잘 추적하고 있음을 보여준다.

가상 제어입력 $u = [u_1 \ u_2]^T$ 는 Fig. 22에 보여 진다. Fig. 23은 용접 이동로봇의 실제 제어입력인 좌우 바퀴의 토크를 보여주며, 가상제어 입력으로 계산된 토크이다. Fig. 24는 좌우 바퀴의 회전수(rpm)를 나타내며, 초기는 좌측바퀴가 우측바퀴보다 크다가 좌우바퀴의 회전수는 10초 근처에서 일치하며, 20초에서는 우측바퀴가 좌측바퀴보다 큼을 알 수있다. 이것은 용접이동로봇이 초기 자세교정에 이어 직진한 후 20초에서 좌회전함을 보인다. Fig. 25은 용접이동로봇의 자세와 용접경로를 보인다.

시뮬레이션 및 실험결과로부터, 추적오차는 고정토치의 경우에도 적응 제어기의 우수한 유효성을 보여준다. 이동로봇의 실제속도는 목표 가상추적 속도에 잘 추적함을 보여준다. β_1, β_2 의 추정 값 $\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2$ 의 빠른 안정성은 추적오차, 속도오차를 더욱 빠르게 줄여 더욱더 빠른 추적성능을 보여준다.

Adaptive controller

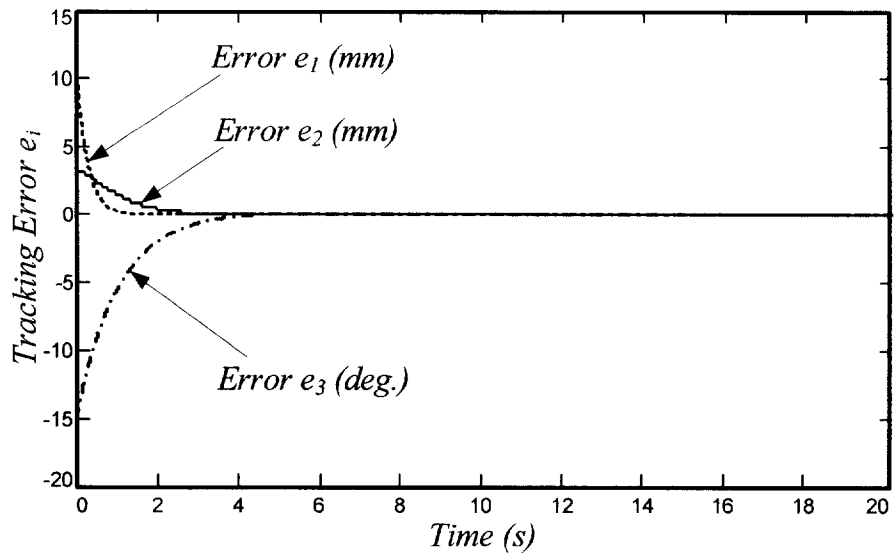
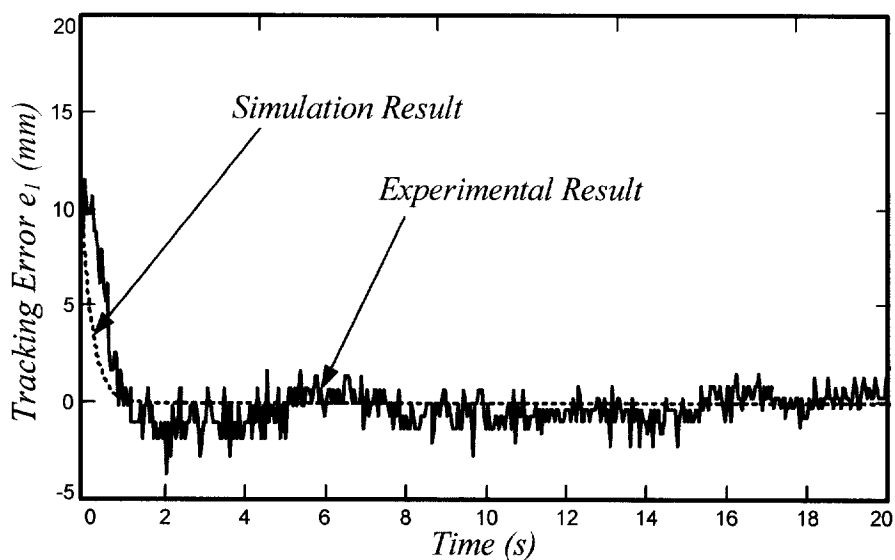
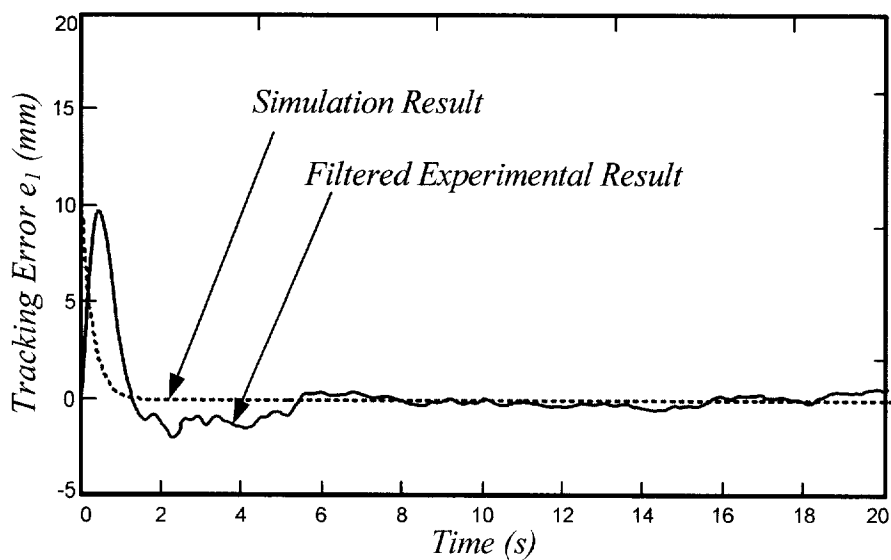


Fig. 13 Tracking errors in simulation

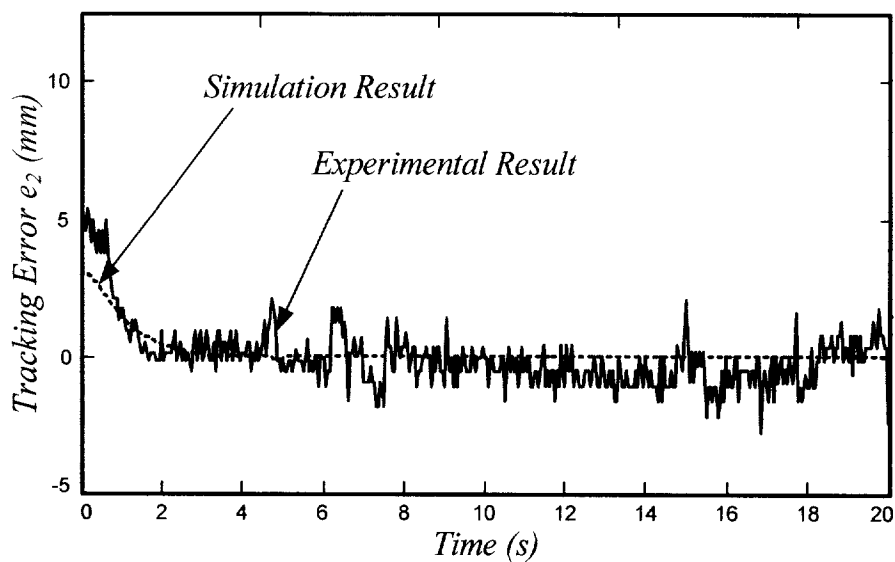


(a) Non-filtered

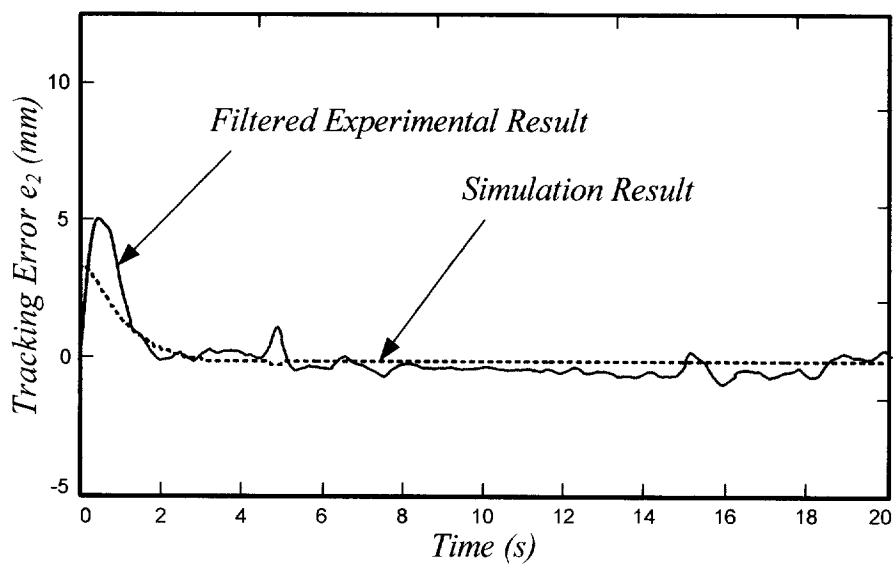


(b) Filtered

Fig. 14 Tracking error e_1 with torch control

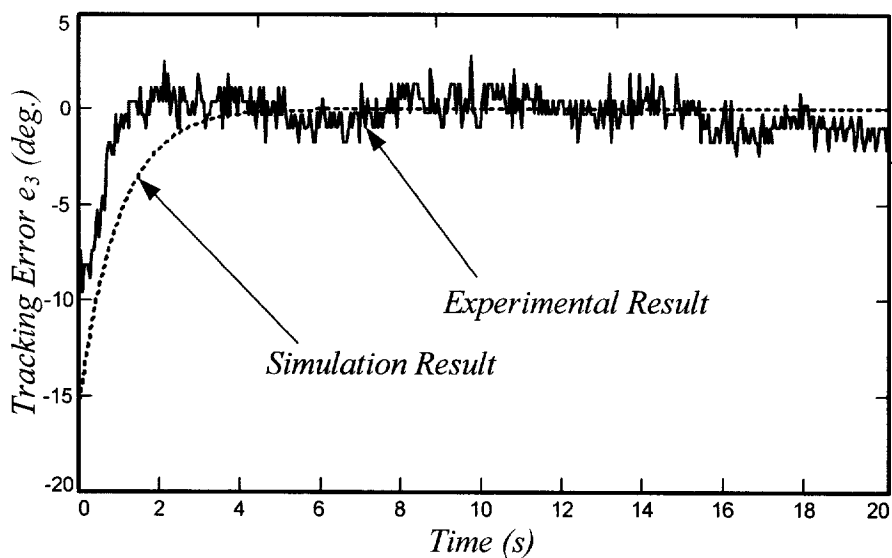


(a) Non-filtered

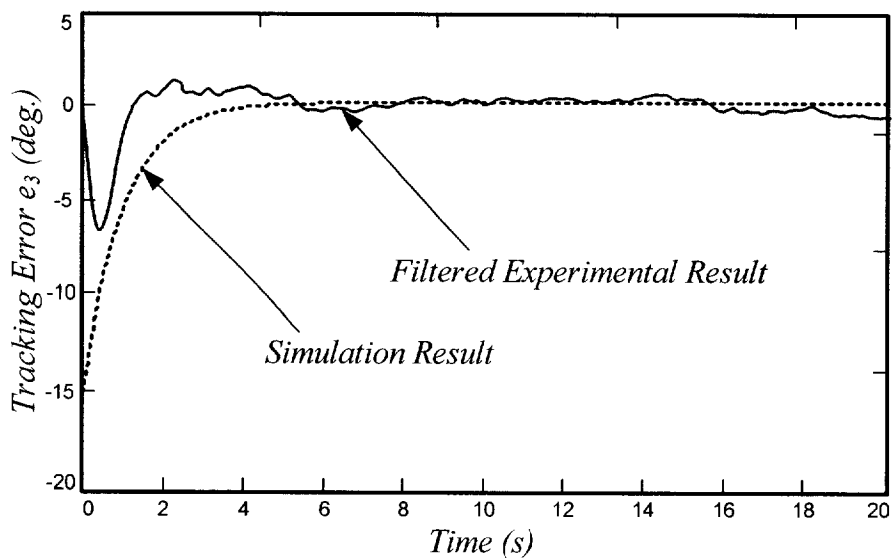


(b) Filtered

Fig. 15 Tracking error e_2



(a) Non-filtered



(b) Filtered

Fig. 16 Tracking error e_3

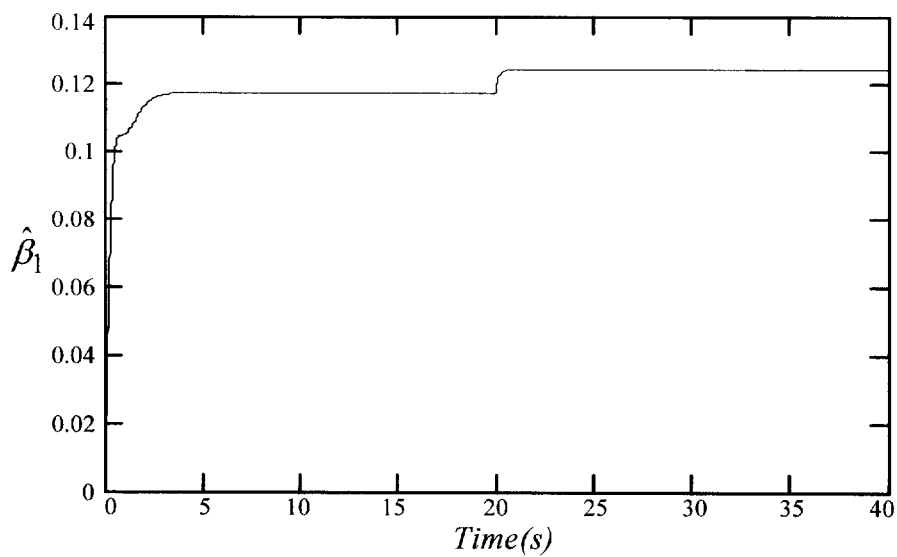


Fig. 17 Estimation value $\hat{\beta}_1$ (Kg m)

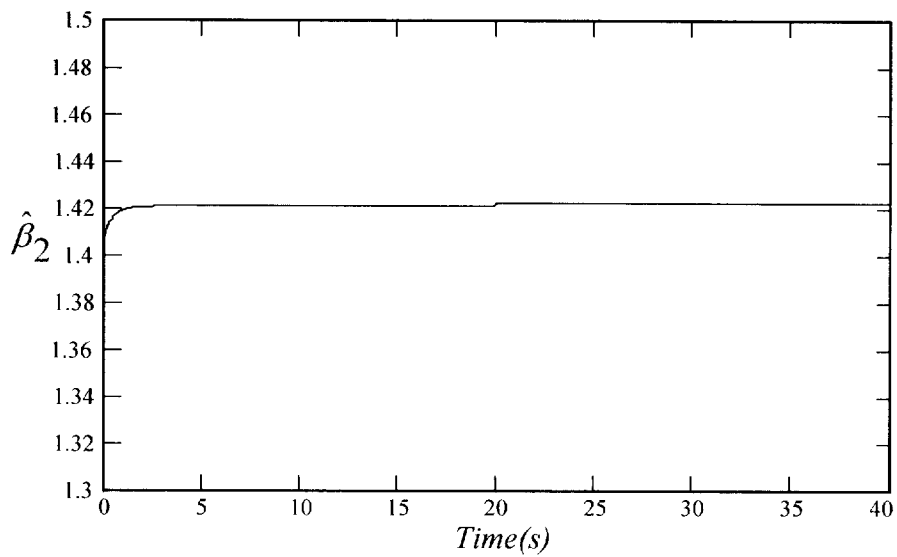
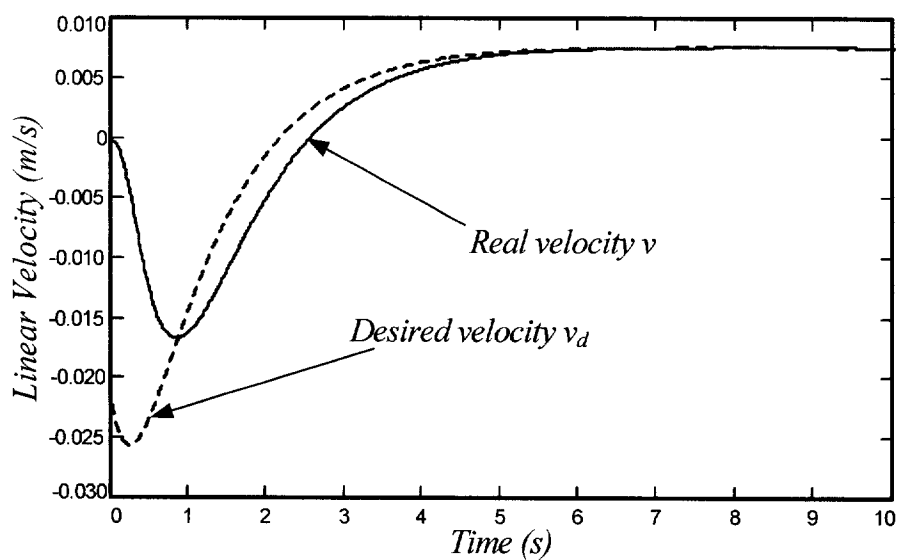
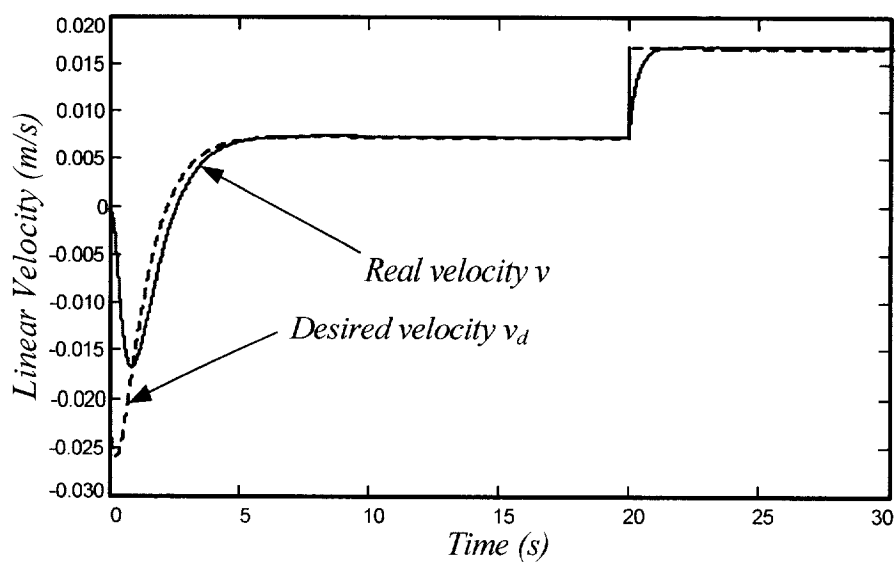


Fig.18 Estimation value $\hat{\beta}_2$ (Kg m²)



(a) Initial time



(b) Full time

Fig. 19 Linear velocity

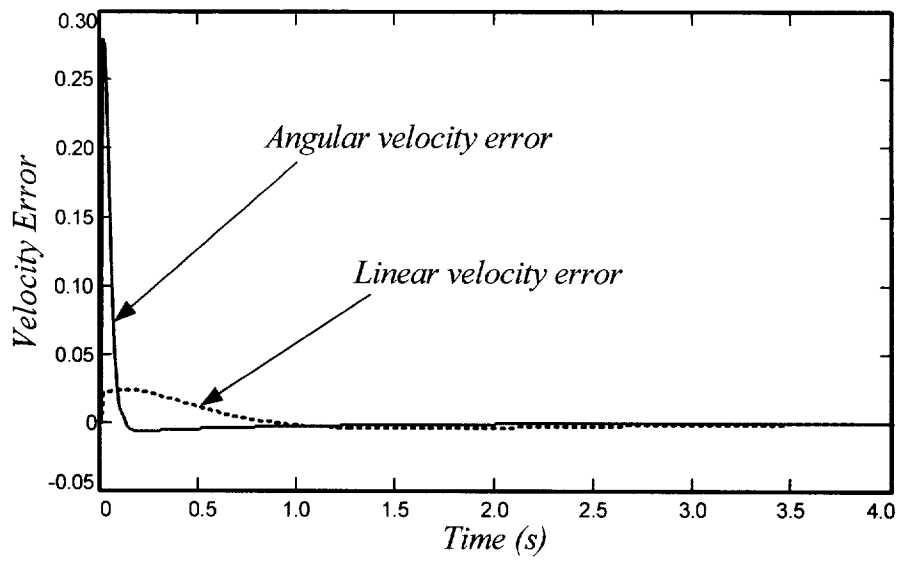
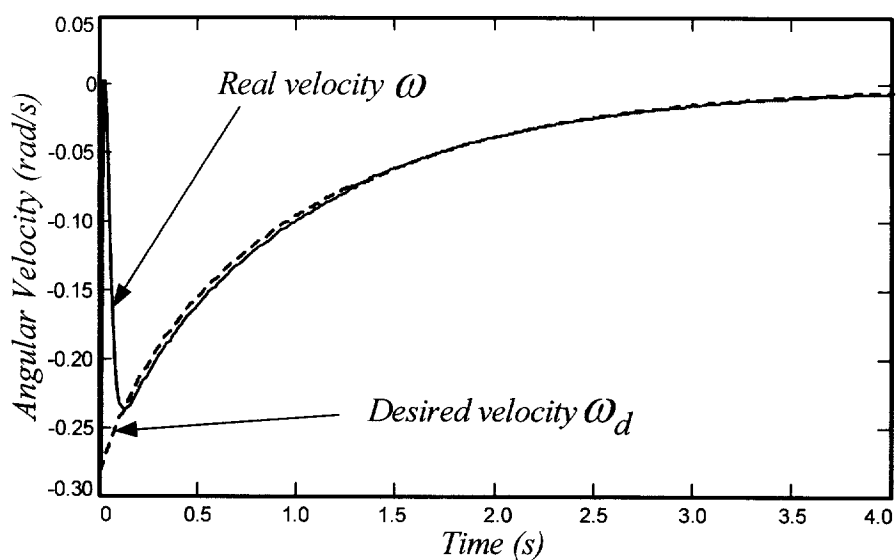
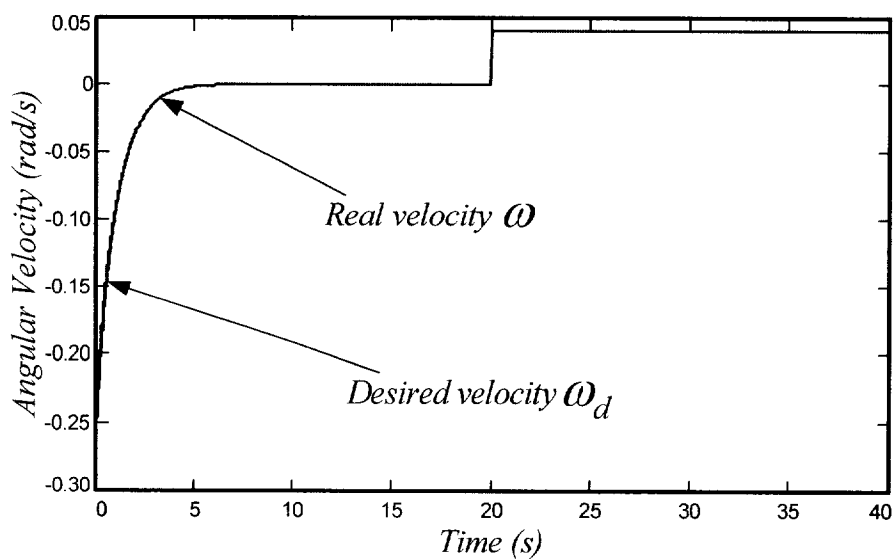


Fig. 20 Velocity error $\tilde{v}$ and $\tilde{\omega}$ (4s)



(a) Initial time



(b) Full time

Fig. 21 Angular velocity

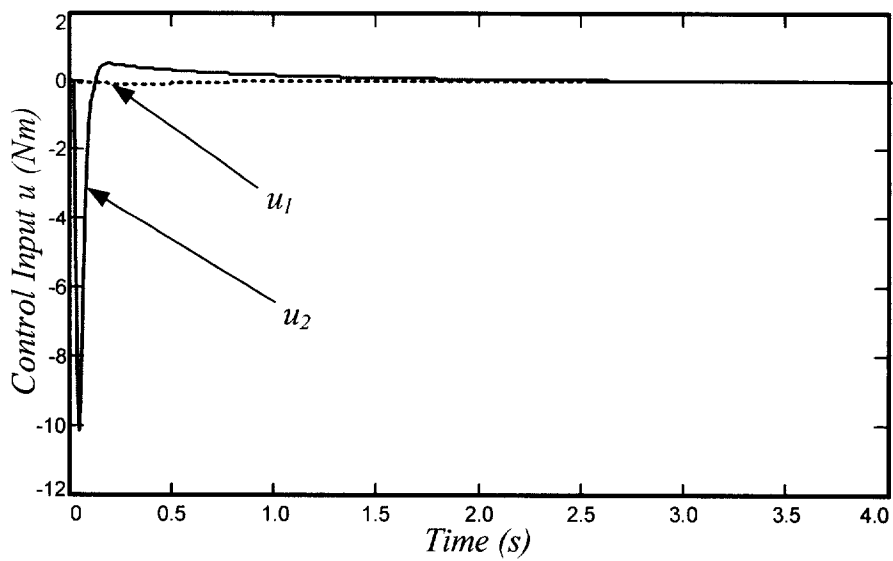


Fig. 22 Control input u (4s)

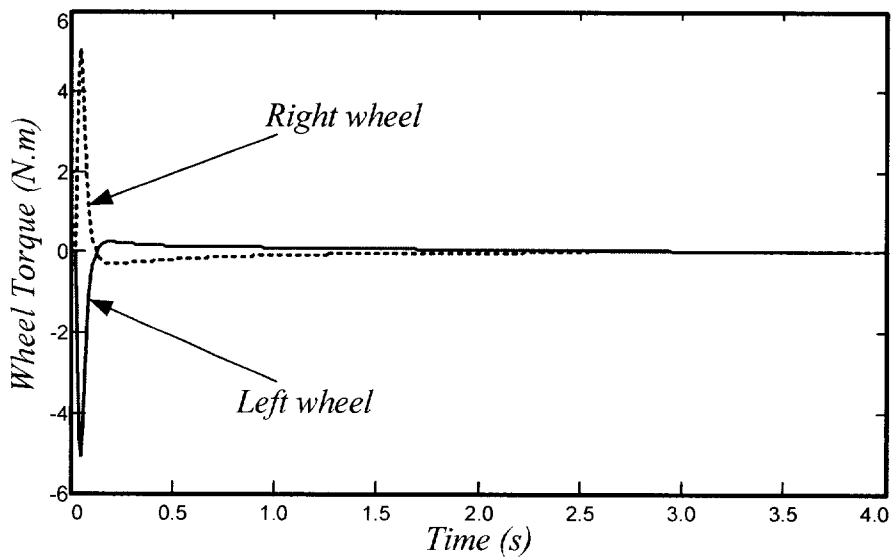


Fig. 23 Wheel torque

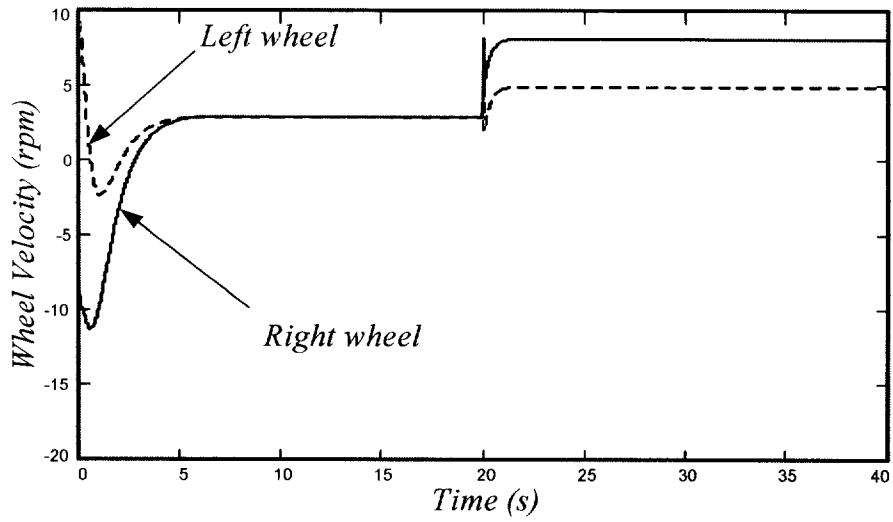


Fig. 24 Rotational velocity of two wheels

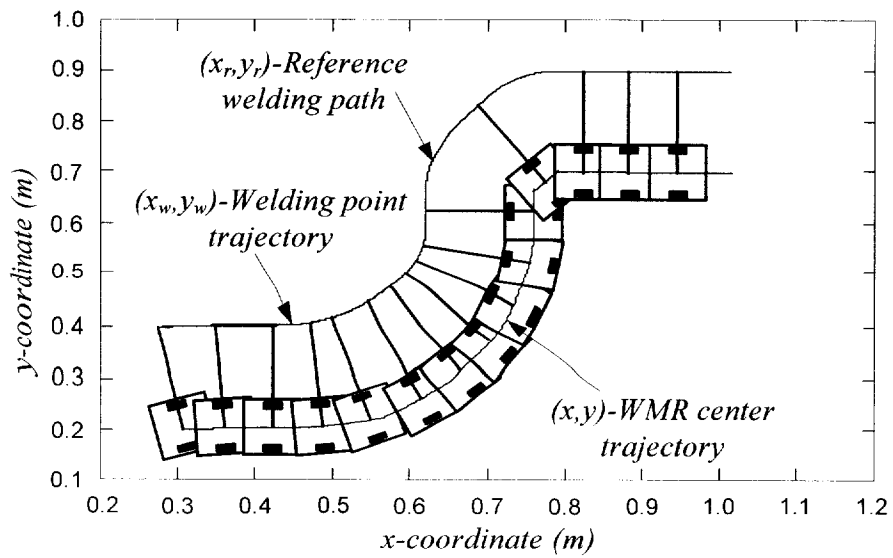


Fig. 25 WMR's movement tracking reference welding path

5.4 Bui의 비선형 적응 제어기 시뮬레이션 및 실험결과

5.4.1 r 과 b 가 미지인 경우

Bui등은 용접이동로봇의 뒷바퀴반경, 대차중심과 뒷바퀴 사이의 거리가 미지이고, 토치길이가 가변일 경우, 운동학적 모델(Kinematic model)을 이용하여 시스템에 미지의 매개변수가 존재하더라도 안정화시키는 비선형 적응 제어기를 제시하고, 제시된 적응 제어기의 유효성을 검증하기 위하여 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다[1]. 그 결과를 Figs. 21-30에서 보여주고 있다. Figs. 26-28은 추적오차의 시뮬레이션 및 실험결과를 보여주고 있다. 실험결과는 시뮬레이션결과에 수렴하면서 미소하게 진동하고 있으며, 1.5초 이내에 모두 영에 수렴함을 보여준다. Fig. 29는 토치길이의 변화에 대한 시뮬레이션 및 실험결과를 보여주고 있으며, 실험결과 시뮬레이션결과는 0.5초 이내에 수렴하고, 이들 모두 일정거리를 유지함을 나타내고 있다. Fig. 30은 토치슬라이더 속도의 시뮬레이션 및 실험결과를 보여주고 있다. 초기에는 급격하게 토치의 길이가 증가된 후 감소하면서 1초 이내에 영으로 수렴하면서 안정화되어 토치가 정지된 상태인 고정토치 형상이 된다.

<r, b: unknown>

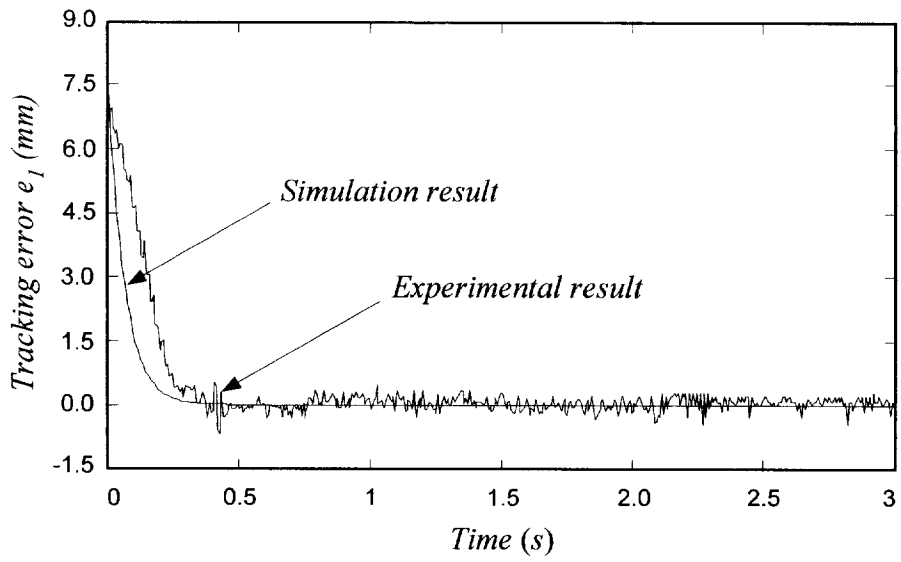


Fig. 26 Tracking error e_1 at beginning

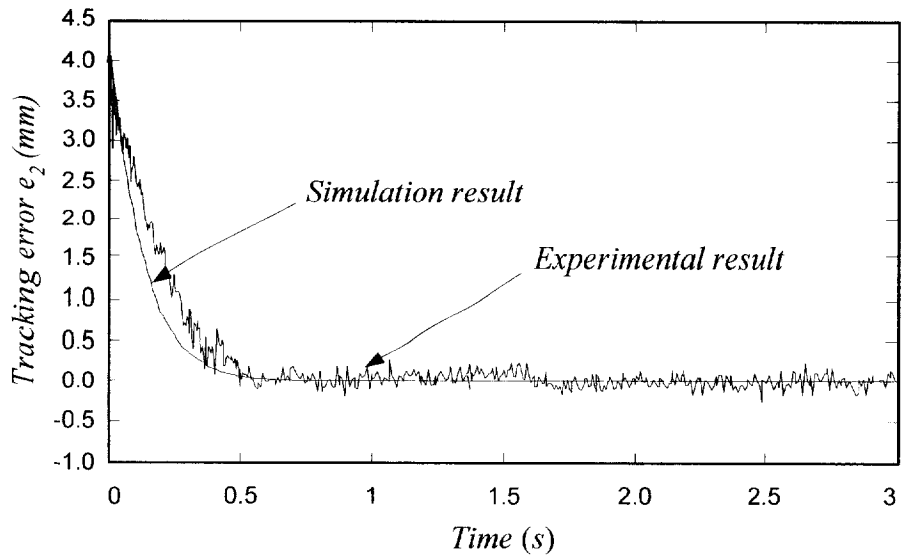


Fig. 27 Tracking error e_2 at beginning

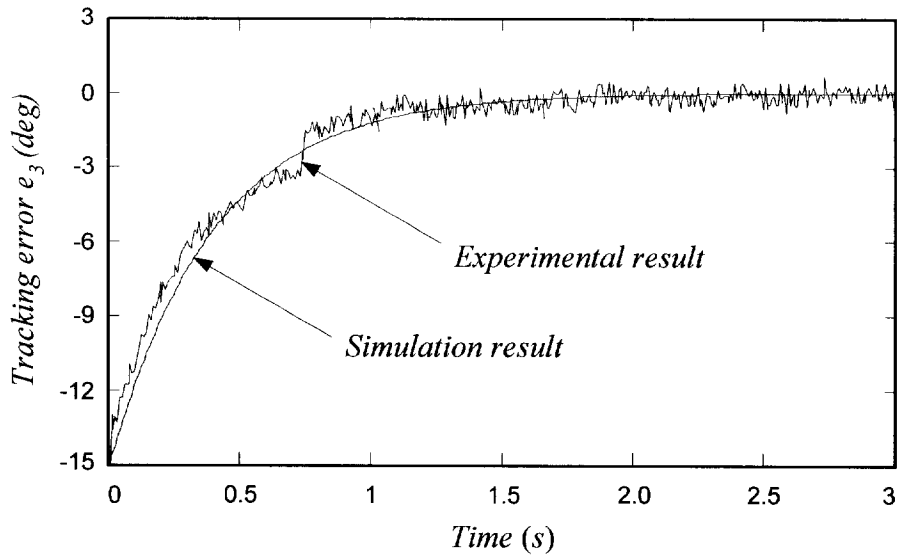


Fig. 28 Tracking error e_3 at beginning

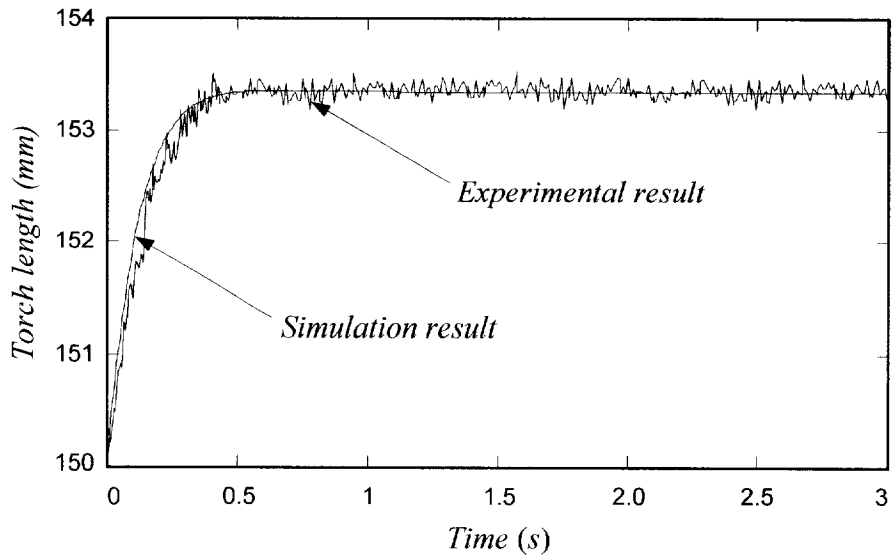


Fig. 29 Torch length at beginning

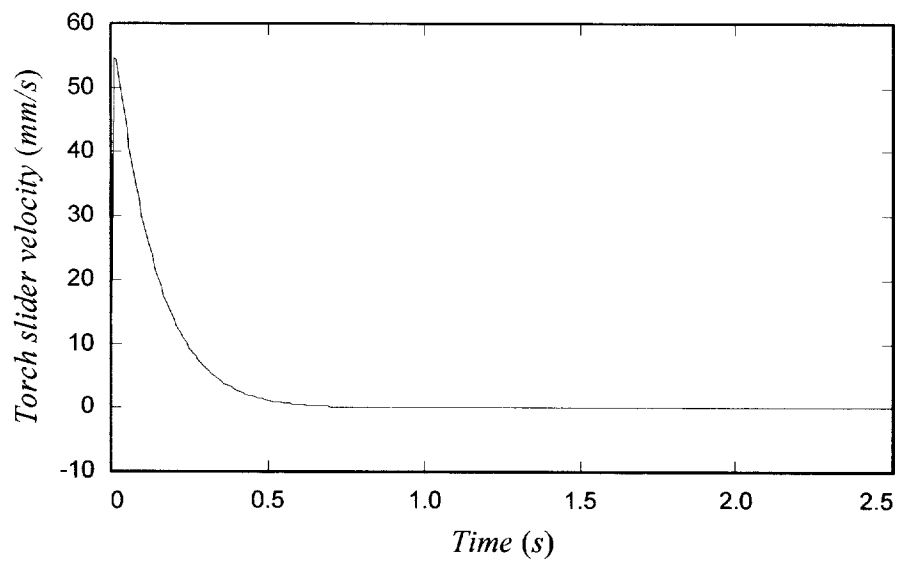


Fig. 30 Torch slider velocity at beginning

5.4.2 시스템 관성모멘트와 d 가 미지인 경우

용접이동로봇 시스템의 관성모멘트, 질량중심과 기하학적 중심 간의 거리(d)가 미지이고 가변토치일 경우, 이러한 미지의 매개변수를 가지는 동력학적 모델을 이용하여, 시스템을 안정화 시키는 비선형 적응 제어기를 제시하고, 제시된 비선형 적응 제어기의 유효성을 검증하기 위하여 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다[1]. 그 결과를 Figs. 31-35에서 보여주고 있다. Figs. 31-33은 추적오차의 시뮬레이션 및 실험결과를 보여주고 있다. 실험결과는 시뮬레이션결과에 수렴하면서 미소하게 진동하고 있으며, 1초 이내에 모두 영에 수렴함을 보여준다. Fig. 34는 토치의 길이변화에 대한 시뮬레이션 및 실험결과를 보여주고 있으며, 시뮬레이션 및 실험결과는 0.5초 이내에 수렴하고, 이들 모두 일정거리를 유지함을 나타내고 있다. Fig. 35는 토치슬라이더 속도의 시뮬레이션 및 실험결과를 보여주고 있다. 초기에는 급격하게 토치의 길이가 증가된 후 감소하면서 1초 이내에 영으로 수렴하면서 안정화되어 토치가 정지된 상태인 고정토치 형상이 된다.

<관성모멘트, d: unknown>

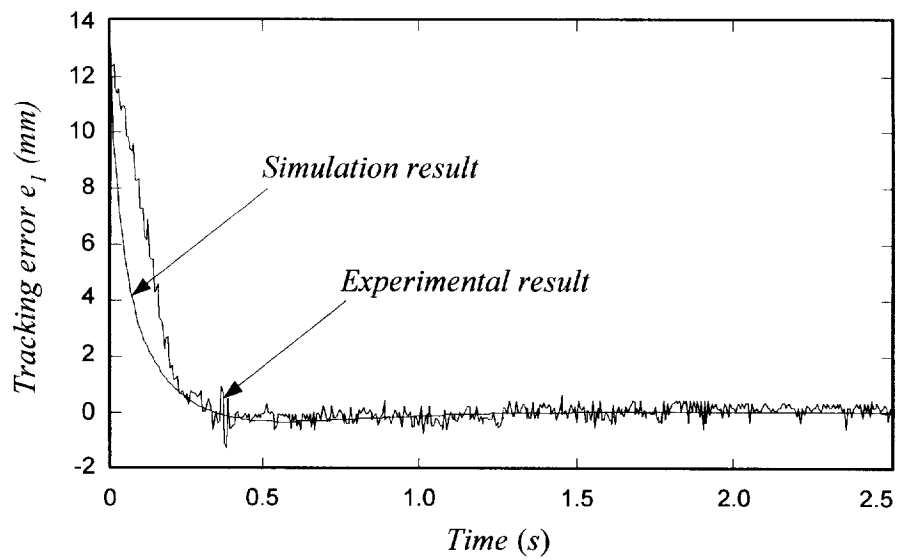


Fig. 31 Tracking error e_1 at beginning

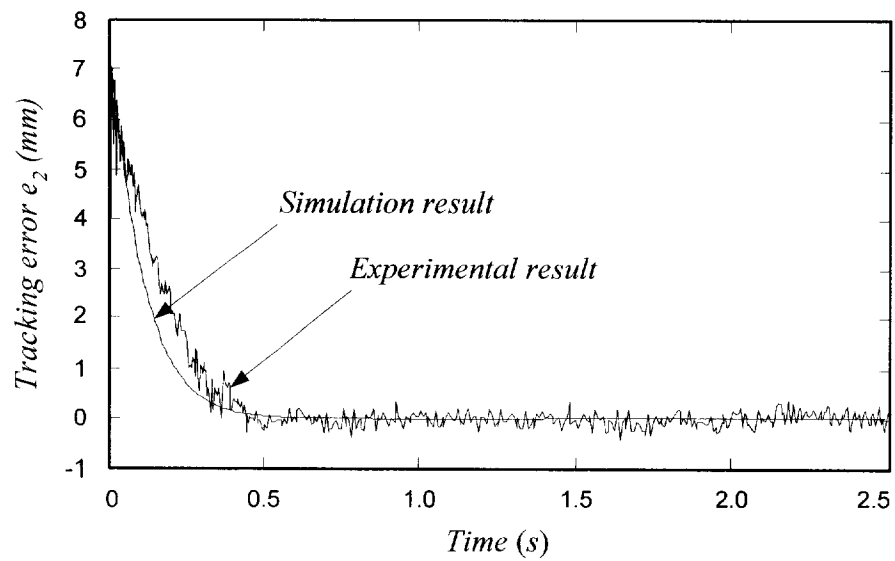


Fig. 32 Tracking error e_2 at beginning

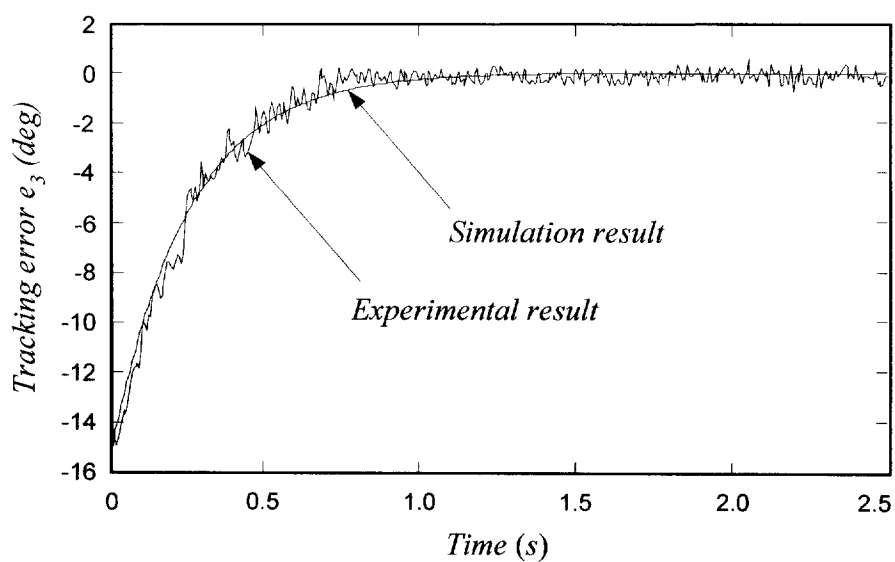


Fig. 33 Tracking error e_3 at beginning

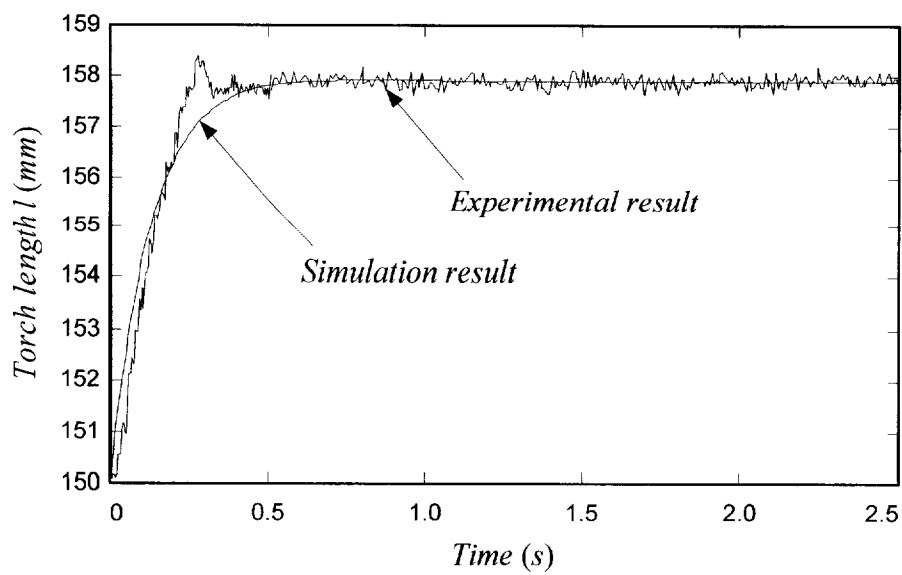


Fig. 34 Torch length l at beginning

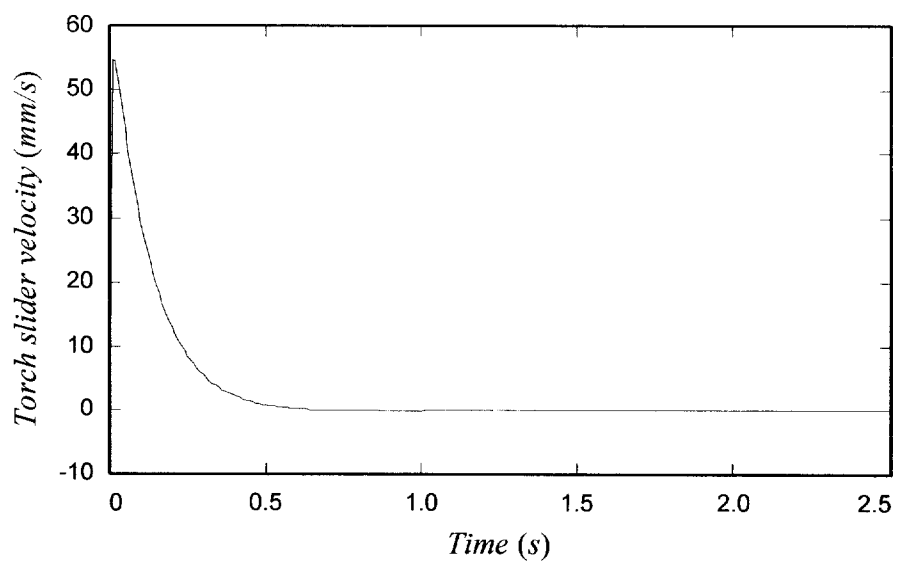


Fig. 35 Torch slider velocity at beginning

제 6 장

결 론

본 연구는 목표속도로 완만한 용접경로를 추적하는 용접이동로봇을 제어하기 위해 백스텝핑법에 의해 설계된 단순 비선형 제어기와 비선형 적응 제어기를 제시한다. 여기서 비선형 적응 제어기는 이동로봇이 질량, 관성모멘트, 바퀴반경, 이동대차의 길이가 미지일 경우에도 목표속도로 완만한 용접경로를 추적하는 용접이동로봇을 제어하기 위해 설계된 제어기이다. 이를 위해, 오차구조를 정의하며, 시스템 운동방정식을 고려한 리아푸노프 감각에서의 안정성 조건으로부터 적응 제어칙을 유도하였다. 또한, 실험을 수행하기 위해 두개의 포텐서미터를 구비한 로타리형 센서로서 제어칙을 유도하기 위한 오차를 측정하는 단순방법이 제시되었다. 제어시스템은 세 개의 PIC16F452 마이크로 컨트롤러를 통합하여 개발하였다. 시뮬레이션 및 실험결과는 제시된 제어기의 유효성을 입증하기 위해 제시되었다.

또한 Bui등이 제시한 두 종류의 적응 제어기와 비교한 결과 본 논문에서 제시한 적응 제어기는 우수한 성능을 가지고 있음을 보였다.

- 백스텝핑법에 의한 완만한 곡선 추적용 단순 비선형 제어기를 제시하였다. 고정토키의 경우에는 완만한 곡선을 추적하였으나 20초 후 속도는 이동대차가 좌회전 하여 목표 용접속도보다 빠르게 추적하였다.
- 이동로봇이 질량, 관성모멘트, 바퀴반경, 대차중심에서 뒷바퀴와의 거리가 미지일 경우에도 목표 속도로 완만한 용접경로를 추적하는 용접이동로봇을 제어하기 위한 적응 제어기를 제시하였다.

- Bui등은 동역학적 모델 및 운동학적 모델을 이용한 경우의 적응 제어기를 제시하였으나 시뮬레이션 및 실험결과 모두 2초 이내에 용접이동로봇의 속도가 목표속도에 수렴되어 안정화되므로, 1.5초 이후에는 완전 속도추적이 가능하다고 생각되므로 운동학적 모델로 간주할 수 있다. 또한, Bui 등에 의해 제시된 제어기는 고정토치에서는 완전목표 용접속도로 완전한 추적이 되지 않았으나($e_2 \neq 0$), 제어 가능한 토치를 사용하여 이를 해결하였다.
- Bui등이 제시한 두 종류의 적응 제어기와 비교한 결과 본 연구에서 제시한 적응 제어기는 우수한 성능을 가지고 있음을 보였다. 즉, Bui등은 첫째, 시스템의 관성모멘트, 용접이동로봇의 질량중심에서 기하학적 중심 간의 거리를 미지이고 가변토치일 경우, 이러한 미지의 매개변수를 가지는 동력학적 모델을 이용하여, 시스템을 안정시키는 적응 제어기를 제시하였고, 둘째, 용접이동로봇의 뒷 바퀴반경과 용접이동로봇의 대차중심과 뒷바퀴사이의 거리가 미지이고, 토치 길이가 가변일 경우, 운동학 모델(kinematic model)을 이용하여 시스템을 안정시키는 적응 제어기를 제시하였다. 이 제시된 적응 제어기의 유효성을 검증하기 위하여 시뮬레이션 및 실험을 수행한 결과와 본 연구에서 제시된 적응 제어기의 시뮬레이션 및 실험결과를 비교한 결과 본 연구에서 제시된 적응 제어기의 우수성을 입증하였다.
- Bui등이 제시한 두 종류의 적응 제어기의 시뮬레이션 및 실험결과 토치길이와 속도의 변화도 1초 이내에 안정화되어 일정한 길이를 유지하고 거의 정지상태에 있으므로 고정토치일 경우와 같아진다. 고정토치로 하였을 경우 $e_2 \neq 0$ 이 되어 단점이 있으나 토치길이를

제어하여 이를 해결하였다. 본 연구에서는 이를 바탕으로 고정토치로 하여 시뮬레이션 및 실험을 수행하였으며, 우수한 추적성능을 보였다. Bui등이 제시한 적응 제어를 실현하기 위해서는 토치슬라이더 제어용, 두개의 구동바퀴 제어용, 주제어기등 모두 4개의 PIC16F877 마이크로 컨트롤러가 필요하다. 하지만 본 논문에서 제시된 제어기의 실현에는 토치슬라이더 제어용 마이크로 컨트롤러가 필요 없으므로 3개의 PIC18F452 마이크로 컨트롤러로 단순화를 이루었다.

References

- [1] Trong Hieu Bui, Tan Lam Chung, Tan Tien Nguyen, and Sang Bong Kim, "Nonlinear Adaptive Control for Trajectory Tracking of Two-Wheeled Welding Mobile Robot with Unknown Parameters", *International Journal of Control, Automation, and System (IJCAS)*, 2004. (Accepted).
- [2] Manh Dung Ngo, Tan Tung Phan, Hak Kyeong Kim and Sang Bong Kim, "Modeling Uncertainty and Robust Control of Welding Robot for Tracking a Rectangular Welding Line", *KSME International Journal*, submitted (July 2004).
- [3] T. H. Bui, T. T. Nguyen, T. L. Chung, and S. B. Kim, "A Simple Nonlinear Control of a Two-Wheeled Welding Mobile Robot", *International Journal of Control, Automation, and Systems (IJCAS)*, Vol. 1, No. 1, pp. 35-42, March 2003.
- [4] T. H. Bui, T. L. Chung, T. T. Nguyen, and S. B. Kim, "Adaptive Tracking Control of Two-Wheeled Welding Mobile Robot with Smooth Curved Welding Path", *KSME International Journal*, Vol. 17, No. 11, pp. 1684-1694, November 2003.
- [5] Paulo Coelho and Urbano Nunes, "Lie algebra application to mobile robot control: a tutorial", *Robotica*, Vol. 21, pp. 483-493, 2003.
- [6] B. M. Kim, and P. Tsiotras, "Controllers for Unicycle-Type Wheeled Robots: Theoretical Results and Experimental Validation", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 18, No. 3, pp. 294-307, 2002.

- [7] Farzad Pourboghrat, and Mattias P. Karlsson, "Adaptive Control of Dynamic Mobile Robots with Nonholonomic Constraints", *Computers and Electrical Engineering*, pp. 241-253, 2002.
- [8] Y. B. Jeon, S. S. Park, and S. B. Kim, "Modeling and Motion Control of Mobile Robot for Lattice Type of Welding", *KSME International Journal*, Vol. 16, No. 1, pp. 83-93, 2002.
- [9] M. L. Corradini, and G. Orlando, "Robust Tracking Control of Mobile Robots in the Presence of Uncertainties in the Dynamical Model", *Journal of Robotic Systems*, pp. 318-323, John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- [10] Y. B. Jeon, S. S. Park, and S. B. Kim, "Modeling and Motion Control of Mobile Robot for Lattice Type of Welding Line", *Trans. of KSME International Journal*, Vol. 16, No. 1, pp. 1207-1216, 2001.
- [11] T. C. Lee, K. T. Song, C. H. Lee, and C. C. Teng, "Tracking Control of Unicycle-Modeled Mobile Robots Using a Saturation Feedback Controller", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 9, No. 2, pp. 305-318, March 2001.
- [12] Y. O. Chung, C. K. Park, and F. Harashima, "A Position Control Differential Drive Wheeled Mobile Robot", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 48, No. 4, pp. 853-863, August 2001.
- [13] W. Dong, and W. L. Xu, "Adaptive Tracking of Uncertain Nonholonomic Dynamic System", *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 46, No. 3, pp. 450-454, March 2001.
- [14] E. Lefeber, J. Jakubiak, K. Tchou, and H. Nijmeijer,

- “Observer Based Kinematic Tracking Controllers for a Unicycle-type Mobile Robot”, *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Seoul, Korea, pp. 2084-2089, May 21-26, 2001.
- [15]B. O. Kam, Y. B. Jeon and S. B. Kim, “Motion Control of Two-Wheeled Welding Mobile Robot with Seam Tracking Sensor”, *Proc. of the 6th IEEE Int. Symposium on Industrial Electronics*, Korea, Vol. 2, pp. 851~856. 2001
- [16]W. E. Dixon, D. M. Dawson, F. Zhang, and E. Zergeroglu, “Global Exponential Tracking Control of a Mobile Robot System via a PE Condition”, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics*, Vol. 30, No. 1, pp. 129-142, February 2000.
- [17]T. T. Nguyen, T. L. Chung, T. H. Bui and S. B. Kim, “A Simple Nonlinear Control of Two-Wheeled Welding Mobile Robot”, *Transactions on Control, Automation, and Systems Engineering*, Vol. 2, No. 1, January, 2000.
- [18]P. Gonzalez De Santos, M. A. Armada, and M. A. Jimenez, “Ship Building with ROWER”, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, pp. 35-43, 2000.
- [19]T. Fukao, H. Nakagawa, and N. Adachi, “Adaptive Tracking Control of a Nonholonomic Mobile Robot”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 16, No. 5, pp. 609-615, October 2000.
- [20]M. Y. Kim, K. W. Ko, H. S. Cho, and J. H. Kim, “Visual sensing and recognition of welding environment for intelligent shipyard welding robots”, *Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 3, pp. 2159-2165, 2000.

- [21]H. Wang, T. Fukao, and N. Adachi, "An Adaptive Tracking Control Approach for Nonholonomic Mobile Robot", *Proceedings 1999 IFAC, World Congress*, pp. 609-615, 1999.
- [22]J. M. Yang, and J. H. Kim, "Sliding Mode Control for Trajectory Tracking of Nonholonomic Wheeled Mobile Robots", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 15, No. 3, pp. 578-587, 1999.
- [23]R. Fierro, and F. L. Lewis, "Control of a Nonholonomic Mobile Robot Using Neural Networks", *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol. 9, No. 4, pp. 589-600, July 1998.
- [24]X. Yun, and N. Sarkar, "Unified Formulation of Robotic Systems with Holonomic and Nonholonomic Constraints", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 14, No. 4, pp. 640-650, August 1998.
- [25]Christopher Edwards, and Sarah K. Spurgeon, *Sliding Mode Control: Theory and Applications*, Taylor & Francis Ltd, 1998.
- [26]R. Fierro, and F. L. Lewis, "Control of a Nonholonomic Mobile Robot: Backstepping Kinematics into Dynamics", *Journal of Robotic Systems*, pp. 149-163, John Wiley & Sons, Inc., 1997.
- [27]A. Tayebi, and A. Rachid, "Backstepping-based Discontinuous Adaptive Control Design for the Stabilization of Nonholonomic Mobile Robots with Matched Uncertainties", *Proceeding of the 36th Conference on Decision & Control*, San Diego, California USA, pp. 3664-3669, December 1997.
- [28]G. Campion, G. Bastin, and B. d'Andrea Novel, "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, 1996.
- [29]R. Mukherjee, D. Chen and G. Song, “Asymptotic Feedback Stabilization of a Nonholonomic Mobile Robot using a Nonlinear Oscillator”, *Proc. of the 35th Conf. on Decision and Control*, Japan, pp. 1422–1427. 1996
- [30]X. Yun and N. Sarkar, 1996, “Dynamics Feedback Control of Vehicles with Two Steerable Wheels”, *Proc. of the 1996 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3105–3110.
- [31]Z. Fan, Y. Koren, and D. Wehe, “Tracked Mobile Robot Control: Hybrid Approach”, *Control Engineering Practice*, Vol. 3, No. 3, pp. 329–336, October 1995.
- [32]Kolmanovsky I. and McClamroch NH., “Developments in Nonholonomic Control Problem,” *IEEE Control System Magazine*, pp. 20–36, 1995.
- [33]C. Samson, “Control of Chained System. Application to Path Following and Time-Varying Point-Stabilization of Mobile Robots”, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 40, pp. 64–77, 1995.
- [34]I. Kolmanovsky, and N. H. McClamroch, “Developments in Nonholonomic Control Problems,” *IEEE Control Systems*, pp. 20–32, December 1995.
- [35]M. Krstic, I. Kanellakopoulos and P. Kokotovic, *Nonlinear and Adaptive Control Design*, John Wiley & Sons, Inc., 1995.
- [36]K. J. Astrom and B. Wittenmark, *Adaptive Control*, Second Edition, Addition-Wesley Publishing Company, Inc., 1995

- [37]R. Fierro and F. L. Lewis, "Control of a Non-holonomic Mobile Robot: Backstepping Kinematics into Dynamics", *Proc. of the 34th Conf. on Decision & Control*, pp. 3805-3810, USA. 1995
- [38]Y. Zheng and P. Moore, "The Design of Time-Optimal Control for Two-Wheeled Driven Carts Tracking A Moving Target", *Proc. of the 34th Conf. on Decision & Control*, pp. 3831-3836. 1995
- [39]N. Sarkar, X. Yun, and V. Kumar, "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, February 1994.
- [40]Jean-Jacques E. Slotine and Weiping Li, *Applied Nonlinear Control*, Prentice-Hall International, Inc., 1991.
- [41]Y. Kanayama, Y. Kimura, F. Miyazaki, and T. Noguchi, "A Stable Tracking Control Method for a Nonholonomic Mobile Robot", *Proceedings of the 1991 IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems*, Japan, Vol. 3, pp. 1236-1241, November 3-5, 1991.

Publications and Conferences

- [1] T. L. Chung, Y. G. Kim, T. H. Bui, and S. B. Kim, “Application of Tracking Control to Welding Mobile Robot Based on Adaptive Backstepping”, 제어 • 자동화 • 시스템공학회 합동학술발표대회 논문집, pp. 287-292, Dec. 12-13, 2003.

- [2] 노만용, 김영규, 김학경, 김상봉, “자유 곡면 경로 추적용 비홀로노믹 두 바퀴 이동 로봇의 적응 슬라이딩 모드 제어”, 2003년도 추계학술대회 논문집, 한국동력기계공학회(KSPSE), 부경대학교, pp. 167-172, Nov. 2003.

- [3] Gun You Lee, Young Gyu Kim, Myung Suck Oh, and Sang Bong Kim, “Development of a High Speed Rotating Arc Sensor System for Tracking Fillet Welding Line”, The 2003 International Symposium on Mechatronics, Vietnam National University, HCM City, pp 92-98, September, 2003.

- [4] Manh Dung Ngo, Young Gyu Kim, Tan Lam Chung and Sang Bong Kim, “Backstepping Control of a Welding Mobile Robot Tracking a Smooth Curved Welding Path” Proceedings of The 2003 International Symposium on Advanced Engineering Pukyong National University, Busan, Korea pp 245-250, 11.13-15, 2003.

감사의 글

본 논문이 완성되기까지 항상 지켜보면서 충고와 조언을 아끼지 않으시면 지도해 주신 지도 교수님이신 김상봉 교수님께 진심으로 머리 숙여 감사드립니다. 항상 부족함이 많은 저에게 학문과 인생을 가르쳐 주셨으며 어려울 때마다 격려와 질책을 아끼지 않으셨던 지도 교수님께 다시 한번 진심어린 마음으로 감사를 올립니다. 항상 따뜻한 마음과 사랑을 아끼지 않으셨던 연구실 선배님 후배님 모두의 어머니이신 사모님께 이렇게 지면을 통해서나마 감사드립니다. 논문 심사 과정에서 따끔한 질책과 아울러 격려를 아끼지 않으셨던 오명석 교수님과 안두성 교수님께 다시 한번 감사드립니다. 그리고, 학부 및 대학원을 진학하기까지 학문의 기초를 지도해 주셨던 모든 교수님들과 학교생활을 가르쳐주고 이끌어주셨던 동문, 동아리, 학과 선후배님들께 감사드립니다.

모든 생활에서 항상 힘과 용기가 되어주신 CIMEC연구실 선배님이신 정남수 선생님, 김광주 선생님, 김성민 선배님, 김성봉 부장님께 감사드리며 학교에 계시면서 항상 물신양면으로 도움을 주신 김학경 선생님, 서진호 선생님, 박성재 선배님께 감사드리고, 본 연구가 이루어지는데 뒤에서 많은 도움을 주신 베트남 유학생Hieu, Lam, Dung, Kim께도 감사드립니다. 그리고 제가 어려울 때나 기쁠 때 항상 함께해준 CIMEC 후배님들 임재성님, 마성진님, 김상찬님, 김영욱님, 김병용님, 이학철님, 이도경님, 조민건님, 정준호님께도 고마운 마음을 전합니다. 또한 연구실을 떠나서도 멀리서나마 많은 관심과 격려 그리고 따끔한 충고를 해주신 이근유 선배님, 감병오 선배님, 정상권 선배님, 김석열 선배님, 이원기 선배님, 김성욱 선배님, 전양배 선배님께 감사의 마음을 전하며 군복무중인 후배님들 제대하는 날까지 몸 건강히 잘 지내시길 바랍니다. 프로젝트를 함께 진행하며 저에게 따뜻한 마음과 관심, 그리

고 격려를 아끼지 않으셨던 어병학과 박수일 교수님, 미생물학과 이명숙 교수님, 그리고 함께 프로젝트를 진행하였던, 어병학과 김수미 선배님, 미생물학과 강지희 선배님, 김영주 후배님과 그 외 어병학과, 미생물학과 여러 후배님들께도 감사의 마음을 전합니다.

본 연구가 있기에 주위에서 많은 도움을 주시고 함께 수고해주신 CIMEC연구실의 김상봉 교수님, 김학경 선생님, 서진호 선생님, 유학생 Lam, 박성재 선배님께 진심으로 감사의 말씀을 전하고, 앞으로 하시는 일 더욱 잘 되시길 기원합니다.

저를 낳아주시고 지금까지 뒷바라지 해주시느라 고생하신 아버지, 어머니의 은혜에 깊은 감사드리고, 항상 옆에서 큰힘이 되어준 형에게도 많은 감사드립니다.

항상 저를 걱정해주시는 모든분께 멀리서나마 행복을 빕니다.

2004 년 12 월 20 일 김 영 규