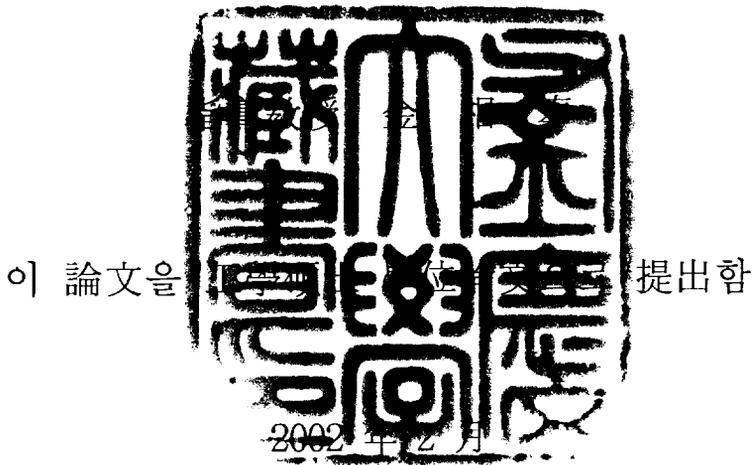


工學碩士 學位論文

격자형 용접 라인 용 주행 로봇의
모델링 및 제어

Modeling and Motion Control of Mobile Robot
for Lattice Type Welding Line



釜慶大學校大學院

機械工學科

田 陽 培

田陽培의 工學碩士 學位論文을 認准함

2001 年 12 月 26日

主 審 工學博士

변 기 식

委 員 工學博士

최 연 욱

委 員 工學博士

김 상 봉



4.3 선회 제어	32
제 5 장 실험 및 고찰	36
5.1 시뮬레이션 및 실험	36
5.2 실험 장치	38
5.3 격자형 주행 로봇의 실험 공정	40
5.4 결과 및 고찰	41
제 6 장 결 론	51
참 고 문 헌	52

Modeling and Motion Control of Mobile Robot for Lattice Type Welding Line

Yang-Bae JEON

*Department of Mechanical Engineering, Graduate School
PUKYONG National University*

Abstract

This paper presents a motion control of a mobile robot for lattice type welding line. Its dynamic equation and motion control methods 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 following straight line or curve. 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 control. 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.

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

열악한 공정 및 품질관리 때문에 현재 다양한 산업분야에서 자동화가 시도되고 있으며, 그 적용범위 또한 지속적으로 확대되고 있다. 특히, 조선 산업 분야에서 조립 공정의 핵심 분야인 용접공정은 작업 중 발생하는 유해가스, 아크광(arc light), 소음(noise), 분진(dust), 흠 등으로 인해 여러 조립공정 중에서도 특히 열악한 작업환경을 가지고 있다. 또한, 수용접 시 작업자의 기능에 따라서 용접품질이 결정되기 때문에 안정된 품질관리와 생산성 향상에 한계가 있으므로 용접자동화는 필요 불가결한 과제이다.

조선 산업 분야에서 배선창은 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 로봇을 사용하고 있지만, 격자의 모서리부는 용접 공정이 매우 난해하기 때문에 작업자의 수작업에 의존하고 있는 실정이다. 따라서, 격자 형태의 용접공정을 완성시키기 위해서는 인력에 의한 모서리부의 용접으로 인해 많은 인력과 시간이 소요되고 있는 실정이다.

최근, 이러한 비효율적인 작업을 보완하기 위해 격자형 모서리부까지 자동으로 용접할 수 있도록 많은 연구가 진행되어왔다. 6자유도를 가지는 매니플레이터 형태의 용접 로봇의 도입으로 격자형 용접 라인의 용접 자동화를 실현할 수 있었다. 용접 매니플레이터는 작업물의 인식에 있어서 여러 가지 방법을 사용하고 있지만, 일반적으로 도면의 파일을

시스템에 입력시킴으로써 용접 공정을 정밀하게 인식한다. 하지만, 격자형 용접 라인 자동화에 용접 매니플레이터의 적용은 여러 가지 문제점을 피할 수 없게 된다. 우선, 용접 공정의 초기 시작점을 찾기 위해서는 상당한 시간이 소요되며, 작업물의 치수오차가 발생한 경우에는 매우 치명적인 오류를 범할 수 있다. 또한, 용접 불량으로 인한 복구 과정은 정상 용접시의 10배 이상의 노력이 필요하게 된다. 그리고, 용접 매니플레이터를 사용하기 위해서는 작업공간이 넓어야 되며, 이동을 위해 천장크래인을 설치함으로써 공간적인 면과 경제적인 면에서 상당히 부담되는 시스템이다. 따라서, 용접 매니플레이터는 이동성, 소형화, 비용 등의 문제로 장소가 매우 협소한 격자형 라인 용접에는 부적절하다. 따라서, 격자형 용접 라인과 같은 열악한 용접 환경에서 자동화를 실현하기 위해 용접 매니플레이터가 가지고 있는 장·단점을 보완할 수 있는 소형, 저중량의 용접 로봇이 필요로 하고 있다.

1.2 연구 내용 및 목적

본 연구는 조선 산업 분야에서 조립 공정의 핵심 분야인 용접공정 중 배의 강도를 높이기 위한 에그 박스(egg box) 형태의 용접 라인을 자율 이동 로봇을 이용하여 용접 자동화하는데 연구 목적을 둔다. 자율 이동 로봇 위에 토치 슬라이더를 탑재하여 격자형 용접 라인의 직선부 및 모서리부까지 자동으로 수행할 수 있는 시스템으로 기존의 용접 매니플레이터 보다 상당히 소형이며, 저중량의 주행 로봇을 개발하였다.

모빌 로봇의 주행 제어에 있어 시스템 모델링은 매우 중요하다. 논홀로노믹(nonholonomic)한 구속조건에서 모빌 로봇의 일반적이고 유익한 모델링은 G. Campion 등에 의해 체계화되었다. 또한, 모빌 로봇 위에

매니플레이터를 부착한 시스템에 관한 연구도 많이 이루어졌는데, Yamamoto 등은 매니플레이터의 위치와 힘을 제어하기 위해 비선형적인 모빌 로봇의 동역학에 대해 입출력 선형화(linearization)를 통한 Nonlinear 제어를 연구하였고, Chung 등은 모델링 오차 등을 없애기 위해 다이나믹 모델링을 기반으로 한 로버스트 제어 및 적응제어를 적용시킨 연구도 이루어졌다. 그리고, Tsuchiya와 Fierro 등은 Lyapunov 이론을 기반으로 한 제어기의 안정성 해석을 통한 Backstepping 기법을 이용하여 모빌 로봇의 운동에 관한 연구가 수행되었다. 이렇게, 모빌 매니플레이터에 대한 대부분의 알고리즘은 모빌 로봇의 위치 제어, 매니플레이터의 위치 및 힘 제어에 초점을 이루어져 있어, 매니플레이터 끝점의 속도 제어에 대한 연구는 취약한 실정이다. 하지만, 용접을 목적으로 하는 모빌 로봇의 경우, 첫째, 직선 라인 또는 커브 라인을 따라 주행하더라도 토치 슬라이더의 끝점 속도인 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 슬라이더의 위치는 용접 토치의 끝이 용접 라인에 항상 유지될 수 있도록 제어해야 되는 문제점이 있다.

따라서, 본 논문에서는 위와 같은 문제점을 해결하기 위해서 논홀로노믹 구속 조건하에서 라그랑지 방정식(Larange equation)을 기반으로 하여 주행 로봇을 모델링 한 후 상태방정식으로 표현하였다. 그리고, 주행 로봇의 직선 주행 제어를 위해 비선형적인 주행 로봇의 동역학에 대해 디커플링 행렬(decoupling matrix)을 구하여 입출력 선형화(linearization)를 통한 Nonlinear 제어법을 제안하였고, 선회 제어를 위

해 주행 로봇이 선회 시 용접 속도와 주행 로봇의 각속도와의 관계 방정식을 이용한 제어법을 제안하였다. 그리고, 토치 슬라이더의 용접선 추적 제어는 잘 알려진 PID 제어를 설계하여 수행하였다. 본 연구에서는 실제 용접용 주행 로봇의 하드웨어(hardware)를 제작하여 실제 실험을 통해서 제안된 제어 알고리즘들의 성능을 확인하였고, 개발한 시스템에 대해 현장 적용 가능성을 검증하였다.

제 2장 시스템의 구성

본 장에서는 개발한 격자형 용접용 주행 로봇의 하드웨어(hardware)를 설명한다. Photo 1은 개발된 용접용 주행 로봇의 외형 사진을 나타낸다. 용접용 주행 로봇의 전체적인 구성은 제어 시스템과 기구 시스템으로 구성된다. 개발된 격자형 용접용 주행 로봇은 접촉 식 센서를 이용하여 로봇의 위치를 피드백하며 용접 라인을 추적한다.

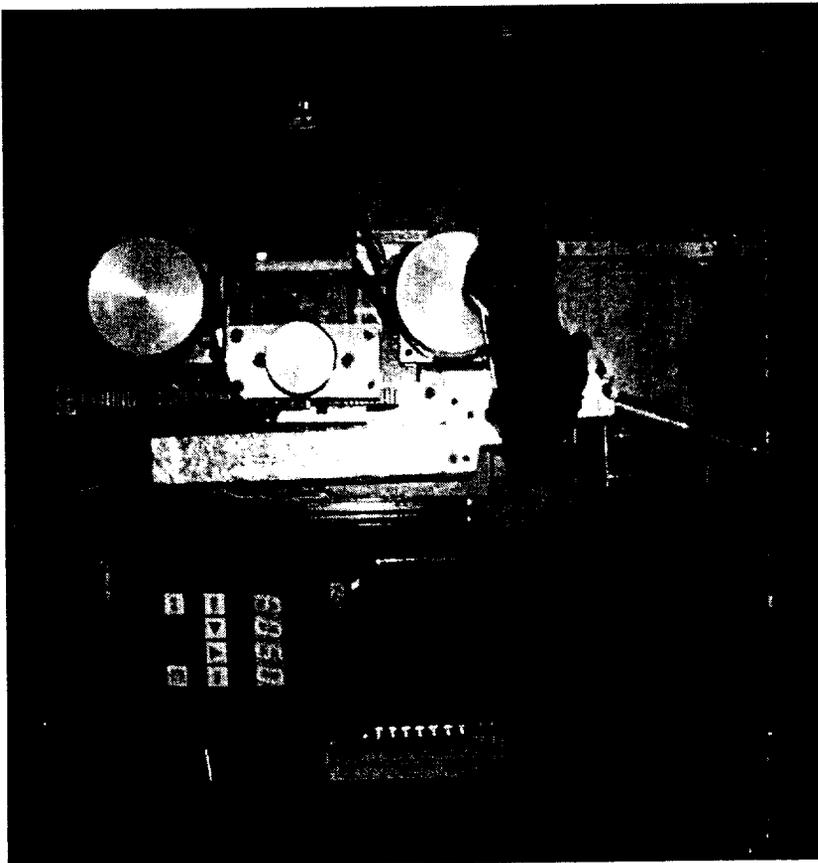


Photo 1 Developed welding mobile robot

2.1 기구 시스템의 구성

Fig. 1은 용접용 주행 로봇의 기구 시스템 구성을 나타낸다. 본 논문에서는 Fig. 1과 같은 주행 로봇을 개발하였으며, 실제 산업 현장에 적용할 수 있도록 제어 시스템을 로봇의 몸체 위에 설치하였다. 또한 로봇의 부피를 최대한 작게 설계하기 위해 메인 프로세서를 원칩 마이크로 프로세서(microprocessor)를 및 DSP(Digital Signal Processor)를 이용하여 부피를 최소화하였다. 개발된 용접용 주행 로봇은 작업자가 직접 용접 라인에 들고 이동할 수 있도록 하기 위해 로봇의 자중을 고려하여 알루미늄 소재를 이용하여 로봇의 본체를 제작하였다.

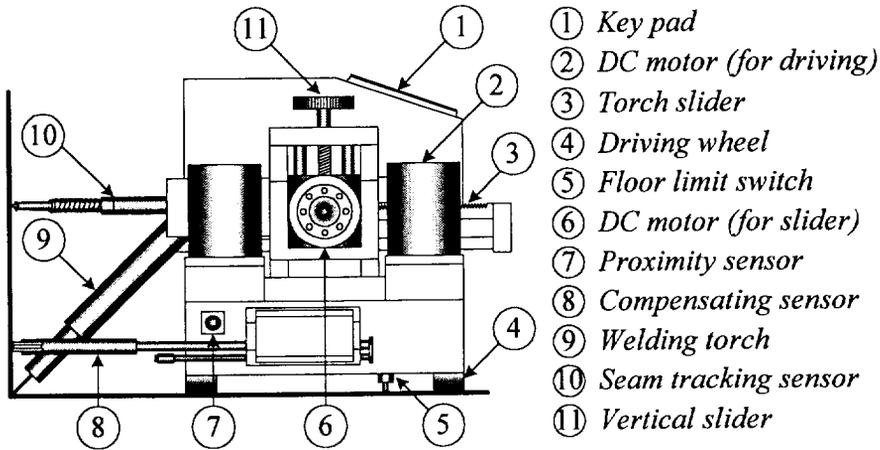


Fig. 1 Configuration of mobile robot

로봇은 구동을 위해서 두 개의 구동용 바퀴를 설치하였다. 두 개의 구동용 바퀴는 로봇 몸체의 기하학적 중심위치를 지나는 축과 평행하게 위치시켰고, 각 바퀴는 독립적으로 두 개의 주행용 24V DC 모터에 의해 제어되도록 하였다. 바퀴는 입사되는 용접 열에 견딜 수 있고 주행

로봇이 모재에서 미끌어지지 않도록 우레탄 소재를 이용하여 제작하였다. 그리고, 두 개의 보조 바퀴는 주행 로봇의 평행을 유지하기 위해 로봇의 앞과 뒤에 작은 모양의 볼 형태로 각각 설치하였다. 로봇이 직선 주행 시 로봇의 자세를 보정하기 위한 자세 보정 센서(compensating sensor)는 로봇의 옆면에 부착하였으며, 자세 보정 센서의 앞부분에는 모재에 잘 미끌어질 수 있도록 베어링을 설치하였다. 센서의 길이를 조정할 수 있도록 길이 조정 나사를 설치하여 용접 모재 및 용접 환경에 따라서 길이를 조정할 수 있도록 하였다. 그리고, 센서의 위치 값을 피드백 하기 위해서 포텐쇼미터(potentiometer)를 설치하였다. 또한, 로봇이 선회 시 로봇의 선회 위치를 감지할 수 있도록 용접용 근접 센서(proximity sensor)를 로봇의 진행 방향과 평행하게 설치하였다. 근접 센서의 감지 길이는 1cm로 용접용 모재와 유사한 소재일 경우에만 감지를 한다.

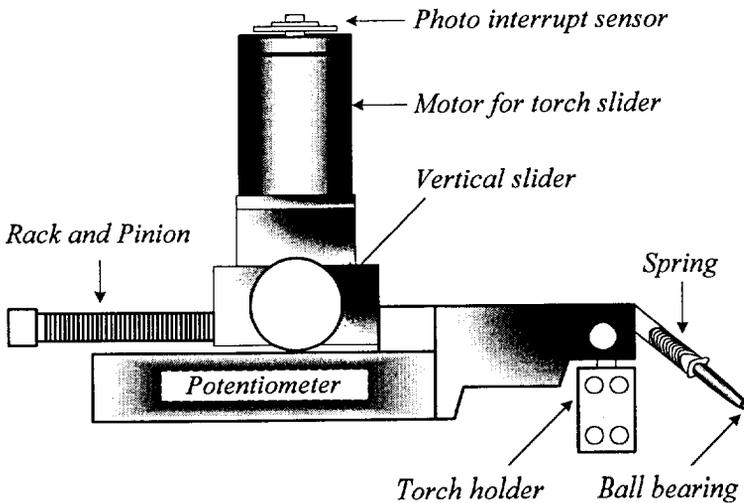


Fig. 2 Configuration of torch slider

로봇의 기하학적 중심의 밑부분에 전자석(electric magnet)을 설치하여 로봇과 용접 모재가 항상 부착될 수 있도록 하였고, 수직 형태의 격자형 용접 라인에도 적용 가능하도록 하였다. 또한 자석 주위에 철 등의 이물질이 많이 붙어있을 경우에도 전자석의 특징으로 전원을 오프(off)하면 이물질이 모두 자동으로 제거될 수 있는 특징을 이용하였다. 그리고, 버튼 형태의 키패드(keypad)를 설치하여 용접 속도 및 조건을 입력시킨다. 용접 속도 및 조건을 숫자 및 영자 형태로 표시하기 위해 7-Segments를 이용하였다.

Fig. 2는 용접선 추적 센서(seam tracking sensor)를 탑재한 토치 슬라이더의 자세한 구조를 나타내고 있다. 토치의 위치를 제어하기 위한 토치 슬라이더는 랙과 피니언(rack and pinion) 기어(gear)로 이루어져 있으며, 24V DC 모터에 의해 슬라이더의 위치가 제어된다. 토치 슬라이더의 위치 피드백을 위하여 포토 인터럽트 센서(photo interrupt sensor)를 이용하였다. 토치 슬라이더는 용접선 추적 센서가 주행 로봇의 기하학적 중심에 위치되도록 설치하였다. 용접선 추적 센서의 앞부분에는 볼 베어링을 설치함으로써 모재와 접촉 시 잘 미끌어질 수 있도록 하였고, 센서 앞단에 스프링을 설치함으로써 용접선 추적 센서가 항상 용접 모재와 접촉할 수 있도록 설계하였다. 또한, 용접선 추적 센서는 토치의 끝의 위치와 동일하도록 각을 기울려 제작하였다. 용접선 추적 센서의 위치는 포텐쇼미터(potentiometer)를 이용하여 피드백한다.

2.2 제어 시스템의 구성

산업 현장에 적용할 수 있도록 메인 프로세서를 원칩 마이크로 프로세서(microprocessor) 및 DSP(Digital Signal Processor)를 이용하여 제

어 시스템의 부피를 최소화하였다. 원칩 마이크로 프로세서는 인텔 (Intel)사에서 나온 80C196KC-20을 이용하였고, DSP는 TI(Texas Instrument)사에서 나온 TMS320C32-PCM50을 사용하였다. 두 프로세서간의 분산 처리를 수행함으로써 각 프로세서의 할당 시간 및 부하율을 최소화하였다. 즉, 마이크로 프로세서에서 여러 센서로부터 입력받은 데이터를 연산 처리 속도가 매우 빠른 DSP로 전송한 후, 전송 받은 데이터를 이용하여 DSP에서는 본 논문에서 제안한 제어 알고리즘을 수치 계산한 후 계산된 데이터를 다시 마이크로 프로세서로 전송을 한다. 마이크로 프로세서는 DSP로부터 입력받은 데이터를 이용하여 주행 로봇의 자세 및 속도 제어를 수행하게 된다.

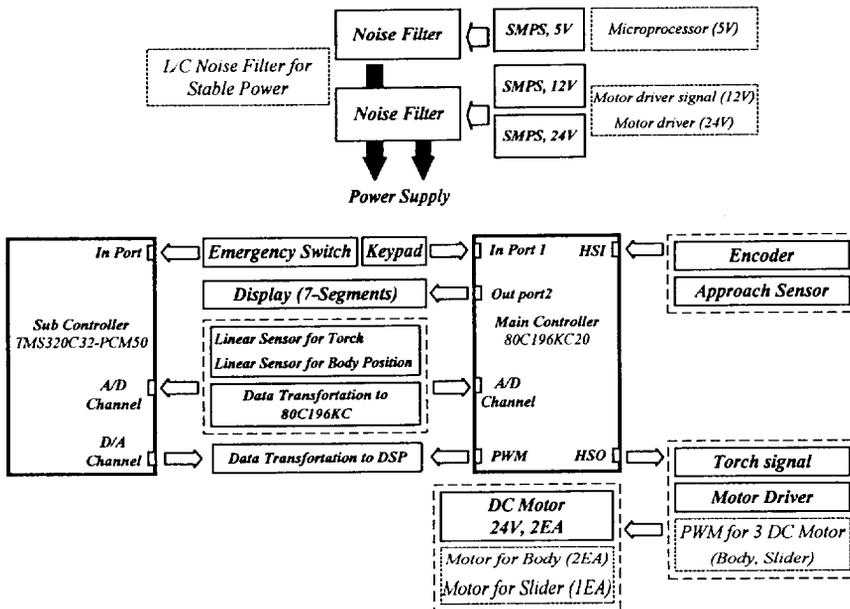


Fig. 3 Configuration of Control System

Fig. 3은 용접 주행 로봇의 제어 시스템 구성도를 나타내고 있다. 메인 제어부인 마이크로 프로세서와 서브 제어부인 DSP의 각 기능과 역할을 나타내고 있으며, 그에 대한 자세한 내용은 다음과 같다.

2.2.1 원칩 마이크로 프로세서의 기능 및 구성

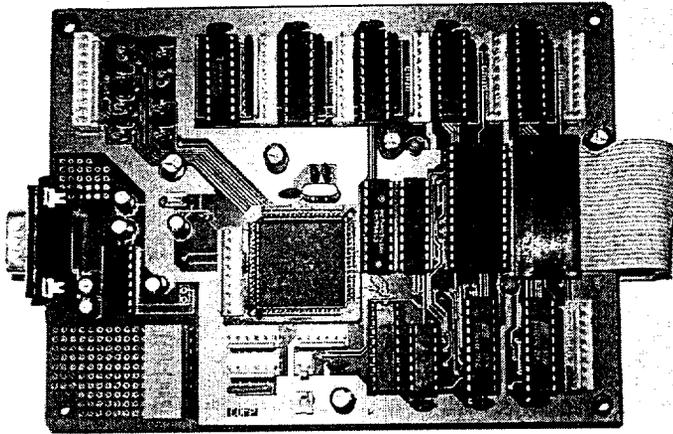


Photo 2 80C196KC-20 Microprocessor Board

원칩 마이크로 프로세서인 80C196KC는 칩내에 8채널의 A/D 변환기를 가지고 있으므로 별도의 A/D변환 모듈을 제작할 필요 없이 간단히 A/D변환이 가능하다. 80C196KC는 Intel사의 16비트 마이크로 프로세서인 8096계열 중의 하나로서 다목적 용도에 알맞게 설계되어 광범위한 응용 분야를 가지고 있다. 본 연구에서 개발한 80C196KC 원칩 마이크로 프로세서 보드의 기능 중 시스템에 적용한 기능은 다음과 같다.

- 고속의 입력을 받아들일 수 있는 HSI(High Speed Input)
- 고속의 출력을 할 수 있는 HSO(High Speed Output)
- 내부 및 외부 클럭에 의한 타이머
- 다른 장치들과 데이터를 주고받을 수 있는 확장 입출력 포트
- 아날로그 입력을 디지털 입력으로 바꾸는 A/D 변환기
- 기본적인 입출력을 할 수 있는 입출력 포트
- PWM(Pulse Width Modulation) 파형의 출력

- 특수한 목적을 위해 정상 모드 이외의 여러 가지 특수 기능 모드
- RS232C 시리얼(Serial) 통신

Photo 2는 로봇의 제어 시스템에 설치된 80C196KC 원칩 마이크로 프로세서 보드의 실물 사진이다. 본 시스템에서는 주행 로봇의 모터 속도를 제어하기 위해 HSI 기능을 이용하여 모터 속도를 피드백하고, HSO 기능을 이용하여 PWM(Pulse Width Modulation)을 생성하여 DC 모터를 구동하였다. 그리고, 입력 포터를 이용하여 키패드(keypad)로부터 용접 속도 및 조건을 입력 받고, 출력 포터를 이용하여 모터의 정역 제어 및 7-Segments에 키패드에서 입력받은 용접 속도 및 조건을 사용자가 알아 볼 수 있도록 출력하였다. 그리고, DSP와 빠른 데이터 통신을 위해서 내장된 A/D 변환기 및 PWM 편을 이용하였다.

2.2.2 DSP의 기능 및 구성

TI(Texas Instrument)사에서 나온 DSP계열 중에 일반 시스템에 가장 많이 적용하고 있는 모델인 TMS320C32-PCM50은 32비트 부동소수점 연산 방식 및 파이프 라인 처리 방식을 채택하고 있어 수치 처리에 있어서 매우 빠른 속도를 내고 있으며, 소숫점 계산이 가능하다는 특징을 가지고 있다.

Photo 3은 본 시스템에 적용한 TMS320C32-PCM50 보드의 실물 사진이다. 본 연구에서 개발한 DSP 보드의 기능 중 시스템에 적용한 기능은 다음과 같다.

- 기본적인 입출력을 할 수 있는 입출력 포트
- 아날로그 입력을 디지털 입력으로 바꾸는 A/D 변환기

- 디지털 입력을 아날로그 입력으로 바꾸는 D/A 변환기
- 2개의 32비트 타이머 인터럽트
- RS232C 시리얼(Serial) 통신

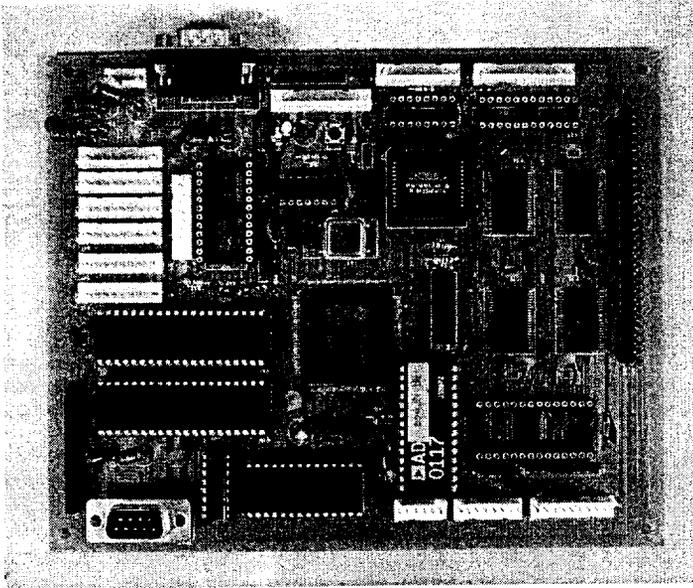


Photo 3 TMS320C32-PCM50 Board

DSP에서는 본 논문에서 제안한 주행 로봇의 제어 알고리즘을 계산하는 기능을 수행하고 있으며, 계산된 데이터를 원칩 마이크로 프로세서로 전송하는 기능을 가지고 있다. 그리고, DSP 보드 내에 설치되어 있는 범용 입출력 인터페이스 IC인 PPM8255를 이용하여 비상 스위치의 입력과 비상등을 켜는 기능을 수행하고 있다.

2.2.3 모터 드라이브의 기능 및 구성

24V DC 모터를 구동하기 위해 DC 모터 드라이브 전용 모듈인 LMD18200을 이용하였다. LMD18200은 TTL 및 CMOS 신호를 입력받

을 수 있게 설계되어 있어 DC 모터 드라이브 보드 설계 시 간단히 구현되며, 3A까지 연속적인 출력 및 최대 6A까지 역기전력에 견딜 수 있어 실제 시스템에 적용하기에 매우 용이하여 본 시스템에 적용하게 되었다.

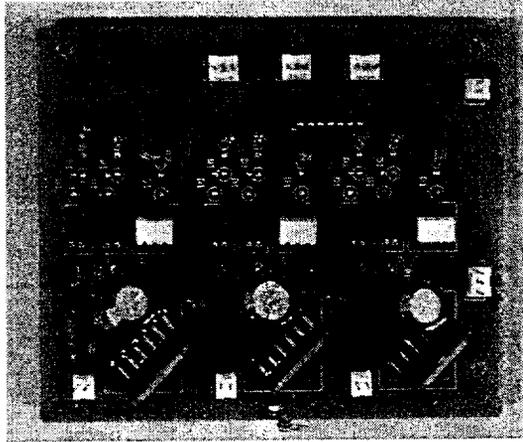


Photo 4 DC Motor Driver

Photo 4는 시스템에 적용한 DC 모터 드라이브 보드의 실제 사진이다. 3개의 모터를 구동 할 수 있도록 모터 드라이브 보드를 설계하였고, TTL 신호의 입력으로 모터의 정·역 및 정지 또는 구동의 기능을 수행 할 수 있도록 보드를 설계하였다.

제 3 장 주행 로봇의 모델링

3.1 동력학적 구속 방정식

이 장에서는 Fig. 4에서 나타낸 것처럼 주행 로봇의 기하학적 운동에 대한 구속 방정식과 운동 방정식을 구한다. 주행 로봇의 기하학적 운동 방정식의 유도 및 다음 장에서 제안한 제어 방법으로 주행 로봇의 제어를 위해 우선 각 상수(parameters)들을 정리하면 다음과 같다.

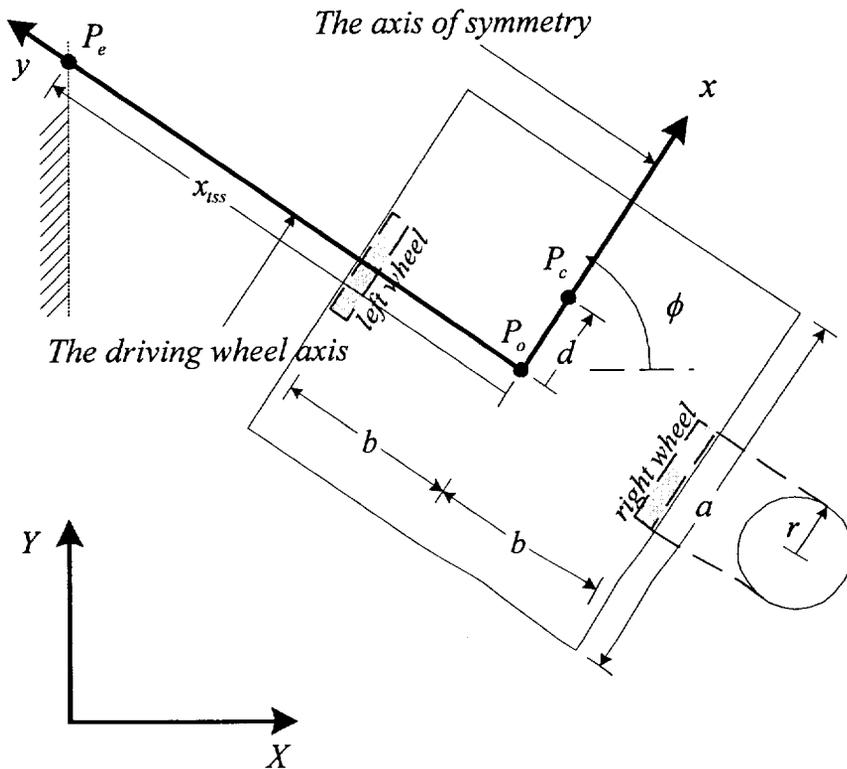


Fig. 4 Motion geometry of mobile robot

Fig. 5는 토치 슬라이더의 구성에 대한 각 변수를 나타내고 있다.

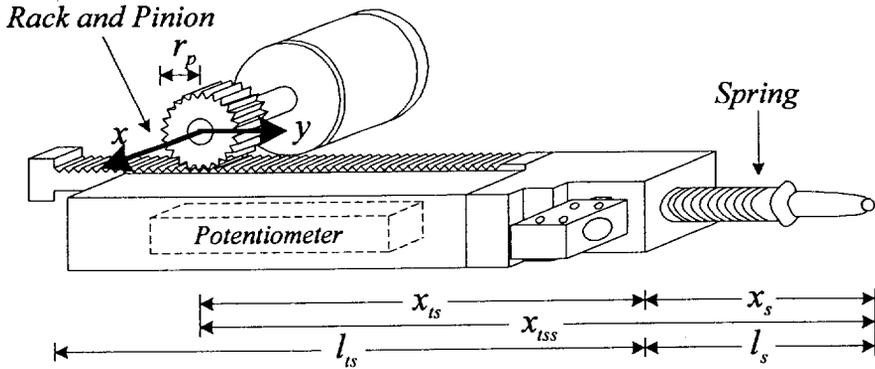


Fig. 5 Configuration of parameters for torch slider

- b : distance between driving wheel and symmetry axis
- d : distance from P_o to mass center of mobile robot
- I_c : inertia moment of mobile robot excluding driving wheels and rotors of motors on a vertical axis through intersection between symmetry axis and driving wheel axis.
- I_m : inertia moment of wheel and motor rotor on wheel diameter
- I_w : inertia moment of wheel and motor rotor on driving wheel axis
- l_s : maximum distance of the seam tracking sensor
- l_{ts} : maximum distance of the torch slider
- m_c : mass of mobile robot excluding masses for driving wheels and rotors of DC motors

- m_w : mass of driving wheel including rotor of motor
 P_c : mass center of the mobile robot with coordinates
 (x_c, y_c)
 P_o : geometric center with coordinates (x_o, y_o) , that is the
intersection between symmetry and the driving wheel axis
 r_p : radius of pinion
 r_w : radius of driving wheel
 x_s : distance of the seam tracking sensor
 x_{ts} : distance of the torch slider
 x_{tss} : distance of the torch end
 $X-Y$: world coordinate system
 $x-y$: coordinate system fixed on the mobile robot

Greeks:

- τ_p : torque acting on the left and right wheel

우선, 주행 로봇의 토치 슬라이더를 제외하고 주행 로봇에 대한 것만 고려하자. 만약, 주행 로봇에 있어서 두 개의 보조 바퀴에 대한 모든 조건을 무시한다면, 주행 로봇은 Fig. 4를 참고하여 다음의 5가지의 변수(parameters)로 모든 기하학적 좌표를 표현할 수 있다.

$$q = [x_c \ y_c \ \phi \ \theta_r \ \theta_l]^T \quad (3.1)$$

여기서, ϕ 는 주행 로봇의 헤딩 각이고, θ_r, θ_l 은 각 좌우 주행용 바퀴의 각도이다. 모빌 로봇은 두 개의 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 주행 로봇에 대한 구속 방정식을 구할 수 있다.

$$\dot{y}_c \cos \phi - \dot{x}_c \sin \phi - \dot{\phi}d = 0 \quad (3.2)$$

$$\dot{x}_c \cos \phi + \dot{y}_c \sin \phi + b\dot{\phi} = r_w \dot{\theta}_r \quad (3.3)$$

$$\dot{x}_c \cos \phi + \dot{y}_c \sin \phi - b\dot{\phi} = r_w \dot{\theta}_l \quad (3.4)$$

위 3개의 구속 방정식을 정리하면 다음의 벡터 형태(vector form)로 나타낼 수 있다.

$$A(q) \dot{q} = 0 \quad (3.5)$$

여기서,

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

$A(q)$ 의 차원(rank)는 3인 것을 쉽게 알 수 있다. 즉, 주행 로봇의 자유도(DOF)수는 $2(5-3)$ 이다.

3.2 주행 로봇의 운동 방정식

주행 로봇은 2차원 평면상에서만 운동하므로 위치에너지는 0(zero)이다 ($V = 0$). 그리고, 마찰에너지가 존재하더라도 주행 로봇의 구동력이 굉장히 커서 무시할 수 있다고 가정하면 마찰에너지는 0(zero)이다 ($F = 0$). 따라서, 주행 로봇에 대한 전체 운동 에너지 T 는 다음과 같다.

$$T = \frac{1}{2} m (\dot{x}_c^2 + \dot{y}_c^2) + m_w d \dot{\phi} (\dot{x}_c \sin \phi - \dot{y}_c \cos \phi) + \frac{1}{2} I_w (\dot{\theta}_r^2 + \dot{\theta}_l^2) + \frac{1}{2} I \dot{\phi}^2 \quad (3.6)$$

여기서;

$$m = m_c + 2m_w$$

$$I = I_c + 2m_w(b^2 + d^2) + 2I_m$$

주행 로봇에 대한 운동 방정식을 구하기 위해서 주행 로봇의 논홀로노믹(nonholonomic) 구속 조건 아래 라그랑지 방정식(Lagrange equation)을 적용하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = \tau_i - \sum_{j=1}^3 A^T_{ij} \lambda_j, \quad i = 1, \dots, 5 \quad (3.7)$$

$$m \ddot{x}_c + m_w d (\ddot{\phi} \sin \phi + \dot{\phi}^2 \cos \phi) = \lambda_1 \sin \phi + (\lambda_2 + \lambda_3) \cos \phi \quad (3.8)$$

$$m \ddot{y}_c - m_w d (\ddot{\phi} \cos \phi - \dot{\phi}^2 \sin \phi) = \lambda_1 \cos \phi + (\lambda_2 + \lambda_3) \sin \phi \quad (3.9)$$

$$m_w d(\ddot{x}_c \sin \phi - \ddot{y}_c \cos \phi) + I\ddot{\phi} = d\lambda_1 - b(\lambda_3 - \lambda_2) \quad (3.10)$$

$$I_w \ddot{\theta}_r = \tau_r - \lambda_2 r_w \quad (3.11)$$

$$I_w \ddot{\theta}_l = \tau_l - \lambda_3 r_w \quad (3.12)$$

여기서,

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$: 3 개의 독립적인 동역학적 구속 조건에 상응하는

라그랑지 멀티플라이(Lagrange multipliers)

τ_r, τ_l : 각 좌우 바퀴에 작용하는 토크

위에서 구한 5개의 방정식들을 행렬형태(matrix form)로 나타내 보면 다음과 같다.

$$M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q}) = E(q)\tau_p - A^T(q)\lambda \quad (3.13)$$

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 운동 방정식을 상태방정식(state space form)으로 변형하기 위해서는 우선 Lagrange multipliers를 제거해야된다. 이를 제거하기 위하여 $A(q)$ 의 null space인 $S(q)$ 를 다음과 같이 정의하였다.

$$\begin{aligned} S(q) &= [s_1(q), s_2(q)] \\ &= \begin{bmatrix} c(b \cos \phi - d \sin \phi) & c(b \cos \phi + d \sin \phi) \\ c(b \sin \phi + d \cos \phi) & c(b \sin \phi - d \cos \phi) \\ c & -c \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.14)$$

여기서,

$$c = \frac{r_w}{2b}$$

여기서 $S(q)$ 의 열(column)은 $A(q)$ 의 null space이다. 이때 $A(q)S(q) = 0$ 이다. 앞의 구속 방정식인 식 (3.5)로부터 $A(q)\dot{q} = 0$ 이므로 \dot{q} 는 $A(q)$ 의 null space라 볼 수 있고, 따라서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{q} \in \text{span}\{s_1(q), s_2(q)\} \quad (3.15)$$

따라서, \dot{q} 는 $s_1(q)$ 와 $s_2(q)$ 의 선형 결합으로 나타낼 수 있음을 알 수 있다. 즉,

$$\dot{q} = s_1(q)\eta_1 + s_2(q)\eta_2 = S(q)\eta \quad (3.16)$$

그리고,

$$\ddot{q} = S(q)\dot{\eta} + \dot{S}(q)\eta \quad (3.17)$$

행렬 $S(q)$ 를 식 (3.14)와 같이 정의하면 $\eta = \dot{\theta}$ 임을 알 수 있다. 여기서 $\dot{\theta} = [\dot{\theta}_r \ \dot{\theta}_l]^T$ 이 된다. 이때, $S^T(q)$ 를 식 (3.13)의 양변에 곱하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} S^T(q)M(q)\ddot{q} + S^T(q)V(q, \dot{q}) \\ = S^T(q)E(q)\tau_p - S^T(q)A^T(q)\lambda \end{aligned} \quad (3.18)$$

여기서, $S^T(q)A^T(q) = 0$ 와 $S^T(q)E(q) = I_{2 \times 2}$ 의 성질을 이용하고, 식 (3.17)을 식 (3.18)에 대입하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$S^T(q)M(q)(S(q)\dot{\eta} + \dot{S}(q)\eta) + S^T(q)V(q, \dot{q}) = \tau_p \quad (3.19)$$

상태 변수를 $x = [x_c \ y_c \ \phi \ \theta_r \ \theta_l \ \dot{\theta}_r \ \dot{\theta}_l]^T$ 로 정의하면, 주행 로봇에 대한 동역학은 다음과 같이 상태방정식으로 구해진다.

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -(S^T MS)^{-1} (S^T M \dot{S} \eta + S^T V) \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ (S^T MS)^{-1} \tau_p \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

이제, 용접 속도를 제어하기 위해서 주행 로봇의 중앙에 설치된 토치 슬라이더를 고려해보자. Fig. 6을 참고하면, 로봇이 (i-1)번째의 위치에서 (i)번째로 이동할 때, 용접 속도를 구하는 과정은 다음과 같다.

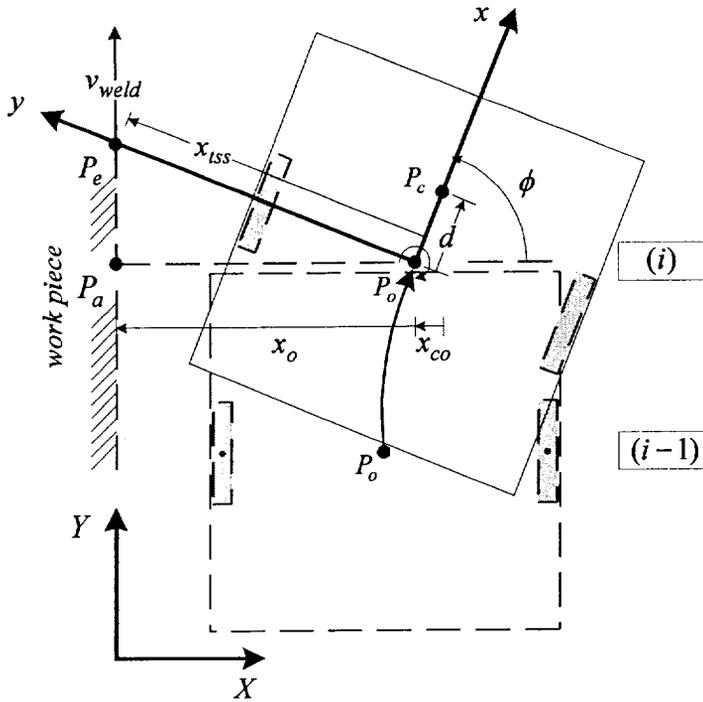


Fig. 6 Motion of the mobile platform.

$$\overline{P_a P_e} = x_{tss} \sin(90 - \phi) \quad (3.21)$$

이때, 식 (3.21)의 양변에 미분을 취하면 다음과 같다.

$$\frac{d \overline{P_a P_e}}{dt} = \dot{x}_{ts} \cos \phi - x_{ts} \dot{\phi} \sin \phi \quad (3.22)$$

여기서,

$$x_{ts} = x_{ts} + x_s = \frac{x_c - x_{co}}{\cos(90 - \phi)} = \frac{x_o}{\sin \phi}$$

$$x_{co} = d \cos \phi$$

식 (3.22)과 주행 로봇의 전방향 속도를 이용하여 다음과 같이 용접 속도를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} v_{weld} &= \frac{d \overline{P_a P_e}}{dt} + v_c \sin \phi \\ &= \dot{x}_{ts} \cos \phi - x_{ts} \dot{\phi} \sin \phi + v_c \sin \phi = v(q) \end{aligned} \quad (3.23)$$

여기서,

v_{weld} : 용접 속도

v_c : 주행 로봇의 전방향 속도

Fig. 5를 참고하여 토치 슬라이더에 뉴턴의 제 2법칙을 적용하면 다음과 같은 식을 구할 수 있다.

$$J \frac{d^2 \theta_{sm}}{dt^2} + D \frac{d\theta_{sm}}{dt} = \tau_s \quad (3.24)$$

여기서,

- J : 회전자의 관성 모멘트
- D : 점성 마찰 계수
- θ_{sm} : 모터 샤프트(shaft)의 각도
- τ_s : 토치 슬라이더에 작용하는 토크

이때, 식 (3.24)의 양변에 피니언(pinion)의 반경 r_p 를 곱하고, $r_p\theta_{sm}$

은 토치 슬라이더의 길이 x_{ts} 임을 이용하여, $\ddot{x}_{ts} = r_p \frac{d^2\theta_{sm}}{dt^2}$ 와

$\dot{x}_{ts} = r_p \frac{d\theta_{sm}}{dt}$ 를 대입하자. 그러면 다음과 같은 식을 구할 수 있다.

$$\ddot{x}_{ts} = -D_m \dot{x}_{ts} + C_m \tau_s \quad (3.25)$$

여기서,

$$D_m = \frac{D}{J}, \quad C_m = \frac{r_p}{J}$$

또한, Fig. 5에 나타난 용접선 추적 센서의 길이 x_s 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$x_s = \begin{cases} \frac{x_o}{\sin \phi} - x_{ts} = l(x_o, x_{ts}, \phi) & : 0 \leq x_s \leq l_s \\ l_s & : x_s > l_s \end{cases} \quad (3.26)$$

용접선 추적 센서의 앞부분에는 센서의 길이 초기화를 위해 스프링이 부착되어 있기 때문에 주행 로봇의 기하학적 위치 및 각도 그리고, 토

치 슬라이더의 위치에 따라 용접선 추적 센서의 길이 x_s 는 최대의 길이가 될 수도 있고, 최대의 길이보다 적다면 식 (3.24)의 위의 식과 같이 구할 수 있다. 즉, 용접선 추적 센서가 용접할 모재에 접촉되지 않는다면 스프링에 의해 센서의 길이는 최대가 될 것이다.

식 (3.20)에 다음의 상태변수 x_{ts} , \dot{x}_{ts} , x_s , v_{weld} 를 추가하면, 격자형 용접라인용 주행 로봇에 대한 모든 상태 방정식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -(S^T MS)^{-1}(S^T M \dot{S} \eta + S^T V) \\ x_9 \\ -D_m x_9 \\ i(x_o, x_{ts}, \phi) \\ \dot{v}(q) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -(S^T MS)^{-1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & C_m \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \tau \quad (3.27)$$

여기서,

$$\begin{aligned} x &= [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7 \ x_8 \ x_9 \ x_{10} \ x_{11}]^T \\ &= [x_c \ y_c \ \phi \ \theta_r \ \theta_l \ \dot{\theta}_r \ \dot{\theta}_l \ x_{ts} \ \dot{x}_{ts} \ x_s \ v_{weld}]^T \\ \tau &= [\tau_r \ \tau_l \ \tau_s]^T \end{aligned}$$

주행 로봇은 토치 슬라이더의 자유도와 함께 모두 3자유도를 갖는다. 모터에 대한 입력의 수와 모빌 로봇의 자유도의 수가 동일하기 때문에 다음과 같이 nonlinear feedback을 주행 로봇에 적용 가능하다.

$$\tau_p = (S^T M \dot{S} \eta + S^T V) + (S^T M S) S^T E u_p \quad (3.28)$$

$$\tau_s = u_s \quad (3.29)$$

이때, 제어 입력을 다음과 같이 정의하자.

$$u = \begin{bmatrix} u_p \\ u_s \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

여기서, u_p 는 주행 로봇에 대한 제어 입력이고, u_s 는 토치 슬라이더에 대한 제어 입력이다. 그러면, 상태방정식인 식 (3.27)은 다음과 같이 간단히 표현 가능하다.

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (3.31)$$

여기서,

$$f(x) = \begin{bmatrix} S\eta \\ 0 \\ x_9 \\ -D_m x_9 \\ \dot{l}(x_0, x_{ts}, \phi) \\ \dot{v}(q) \end{bmatrix} \quad g(x) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ I_{2 \times 2} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & C_m \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

제 4 장 제어 알고리즘

4.1 토치 슬라이더 제어

토치 슬라이더를 제어하기 위해 PID 제어법을 사용하였다. 토치 슬라이더의 위치를 출력방정식으로 다음과 같이 정의하였다.

$$y_s = h_s(x) = x_s \quad (4.1)$$

용접선 추적 센서의 위치 에러를 다음과 같이 정의하였다.

$$e_s = x_s^d - x_s \quad (4.2)$$

식 (3.26)에서의 토치 슬라이더를 위한 제어 입력은 다음과 같이 각 계 인과 함께 PID 제어기를 이용하여 구하였다.

$$u_s = K_{P_s} e_s + K_{I_s} \int e_s dt + K_{D_s} \dot{e}_s \quad (4.3)$$

여기서,

K_{D_s} : derivative gain for the torch slider

K_{I_s} : integral gain for the torch slider

K_{P_s} : proportional gain for the torch slider

4.2 직선 주행 제어

직선 주행에 있어서 용접 속도를 제어하기 위해 모빌 로봇의 위치와 속도를 제어하였다. 로봇의 위치와 속도를 제어하기 위해 다음과 같이 2개의 출력 방정식을 선택하였다.

$$y_p = h_p(x) = [h_{p1}(q) \quad h_{p2}(\eta)]^T = [y_{p1} \quad y_{p2}]^T \quad (4.4)$$

여기서,

$h_{p1}(q)$: 주행 로봇의 무게 중심점 P_c 와 설계된 경로까지의 가장 짧은 거리

$h_{p2}(\eta)$: 주행 로봇의 전방향 속도

직선 라인을 고려하기 위해 경로를 $Px + Qy + R = 0$ 과 같이 고려하면, 가장 짧은 거리 $h_{p1}(q)$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$h_{p1}(q) = h_{p1}(x_c, y_c) = \frac{Px_c + Qy_c + R}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (4.5)$$

그리고, 주행 로봇의 전방향 속도에 대한 출력 방정식은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$h_{p2}(\eta) = \dot{x}_c \cos \phi + \dot{y}_c \sin \phi = \frac{r_w}{2}(\eta_1 + \eta_2) \quad (4.6)$$

가장 짧은 거리 $h_{p1}(q)$ 에 대한 디커플링 행렬(decoupling matrix)은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\dot{y}_{p1}(q) &= \frac{\partial h_{p1}}{\partial x} \dot{x} = \frac{\partial h_{p1}}{\partial x} f(x) + \frac{\partial h_{p1}}{\partial x} g(x)u \\ &= L_f h_{p1}(x) + L_g h_{p1}(x)u = J_{h_{p1}}(q)S(q)\eta\end{aligned}\quad (4.7)$$

여기서, $L_f h_{p1}(x): \mathcal{R}^n \mapsto \mathcal{R}$ 와 $L_g h_{p1}(x): \mathcal{R}^n \mapsto \mathcal{R}$ 는 각 f 와 g 에 대응하는 h_{p1} 의 리에 미분(Lie derivatives)을 나타낸다.

$L_g h_{p1}(x) = 0$ 의 성질로부터 식 (4.7)의 양변에 미분을 취하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\ddot{y}_{p1} &= \frac{\partial L_f h_{p1}}{\partial x} f(x) + \frac{\partial L_f h_{p1}}{\partial x} g(x)u \\ &= L_f^2 h_{p1}(x) + L_g L_f h_{p1}(x)u \\ &= \frac{\partial [J_{h_{p1}}(q)S(q)]}{\partial q} \eta + J_{h_{p1}}(q)S(q)u_p\end{aligned}\quad (4.8)$$

식 (4.8)에서 $L_f^2 h_{p1}(x)$ 는 $L_f(L_f h_{p1})(x)$ 를 나타내고, $L_g L_f h_{p1}(x)$ 는 $L_g(L_f h_{p1})(x)$ 임을 알 수 있다. 그리고,

$$J_{h_{p1}}(q) = \frac{\partial h_{p1}}{\partial q} = \frac{1}{\sqrt{P^2 + Q^2}} [P \quad Q \quad 0 \quad 0 \quad 0].\quad (4.9)$$

이다. 그리고, 주행 로봇의 전방향에 대한 출력 방정식을 미분을 취하면 다음과 같다.

$$\dot{y}_{p2} = \frac{\partial h_{p2}}{\partial q} \dot{x} = J_{h_x}(q) u_p \quad (4.10)$$

여기서,

$$J_{h_x} = \frac{\partial h_{p2}}{\partial q} = \begin{bmatrix} \frac{r_w}{2} & \frac{r_w}{2} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

따라서, 출력 방정식인 식 (4.5)와 식 (4.6)에 대한 디커플링 행렬 (decoupling matrix)은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Phi = \begin{bmatrix} J_{h_{p1}}(q) S(q) \\ J_{h_x} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

만약, Φ 가 모든 x 에 대하여 역행렬이 존재한다면, 주행 로봇의 직선 주행 제어를 위한 제어 입력은 다음과 같다.

$$u_p = \Phi^{-1}(v_p - \dot{\Phi}\eta) \quad (4.13)$$

여기서,

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

K_{D_p} : derivative gain for the mobile robot

K_{P_p} : proportional gain for the mobile robot

주행 로봇의 전방향 속도에 대한 에러와 위치에 대한 에러는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} e_p \\ e_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1^d - y_{p1} \\ v_2^d - y_{p2} \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

4.3 선회 제어

격자형 용접 라인에서 근접 센서가 턴 포인터를 감지하면, 로봇은 선회하기 시작한다. 선회 시 로봇의 두 바퀴의 방향은 서로 반대이고, 완전히 동일한 속도로 제어되어 회전한다. 또한, 로봇 본체 중심에 설치된 전자석에 의해 본체의 기하학적 원점을 중심으로 선회하게 된다. 따라서, 주행 로봇의 전방향 속도는 0(zero)으로 가정할 수 있다. 그러므로, 선회 시 용접 속도는 직선 주행 시 용접 속도에서 전방향 속도를 제외한 방정식임을 알 수 있다. 식 (3.22)와 위의 가정을 이용하면 선회 시 용접 속도와 로봇의 각속도와의 관계 방정식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} v_{weld} &= \overline{P_a P_e'} = x_{tss} \dot{\phi} \cos \phi - x_{tss} \phi \dot{\sin} \phi \\ &= \frac{d}{dt} \left\{ \frac{x_o}{\sin \phi} \right\} \cos \phi - x_o \dot{\phi} \end{aligned} \quad (4.15)$$

주행 로봇이 선회 할 때, 주행 로봇의 초기 위치는 위의 가정에 의해 시불변 함을 알 수 있다 ($x_o = constant$). 따라서, 용접 속도는 다음과 같이 간단한 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$v_{weld} = -x_o \left(\frac{\cos \phi^2}{\sin \phi^2} + 1 \right) \dot{\phi} \quad (4.16)$$

따라서, 주행 로봇이 선회 시 용접 속도와 주행 로봇의 각속도와의 관계 방정식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{\phi} = - \frac{\sin \phi^2 v_{weld}}{x_o} \quad (4.17)$$

선회 시 출력 방정식을 다음과 같이 주행 로봇의 각 속도로 정하였다.

$$y_p = h_p(x) = \dot{\phi} \quad (4.18)$$

이때, 각 속도의 에러는 다음과 같다.

$$e_p = \frac{\sin \phi^2 v_{weld}}{x_o} - \dot{\phi} \quad (4.19)$$

식 (4.19)를 이용하여 주행 로봇이 격자형 용접라인에서 선회 시 용접 속도를 제어하기 위한 제어 입력은 다음과 같다.

$$u_p = (K_{P_p} e_p + K_{D_p} \dot{e}_p) \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

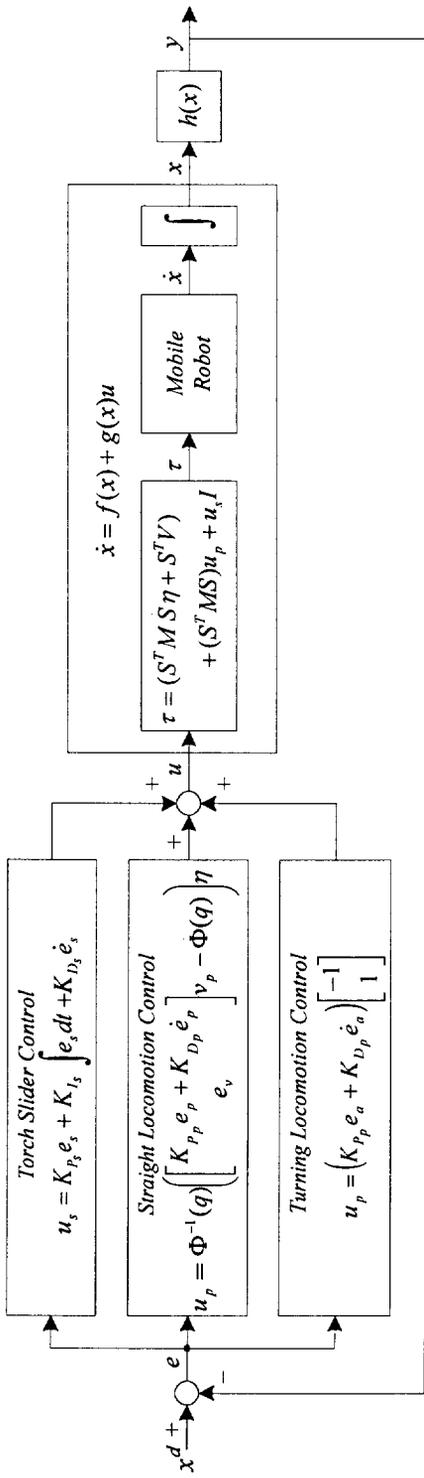


Fig. 7 Block diagram of closed loop system

Fig. 7은 주행 로봇에 대한 3가지 자세 제어에 대한 피드백 루프 (feedback loop) 제어 알고리즘을 나타낸다. 직선 주행 제어와 선회 제어는 각 경우에 따라서 제어가 수행되지만, 토치 슬라이더에 대한 제어는 항상 수행된다. Fig. 7에서 x^d 는 각 제어기에 대한 기준 값 (reference values)이다. 그리고, e 는 각 출력에 대한 에러 값(error values)이다.

제 5 장 실험 및 고찰

본 장에서는 주행 로봇의 시뮬레이션 및 실험 과정을 나타내고 각 결과를 정리하였다. 시뮬레이션에 사용된 파라미터(parameters) 및 초기 위치 값들은 실제 실험 과정을 배경으로 하여 설정하였고, 실제 실험에서의 결과를 시뮬레이션 결과와 비교하였다.

5.1 시뮬레이션 및 실험

격자형 용접 라인용 주행 로봇의 시뮬레이션은 직선형 및 격자형 용접 라인에 각각 적용하였다. 시뮬레이션에서는 시스템의 노이즈나 외부로부터의 외란이 시스템에 영향을 미치지 않는다고 가정하였다. 시뮬레이션에서 사용된 로봇의 파라미터(parameters)의 값은 실제 개발된 시스템을 바탕으로 Table 1에 정리하였다.

Table 1 Numerical values of mobile robot

<i>Parameters</i>	<i>Values</i>	<i>Units</i>	<i>Parameters</i>	<i>Values</i>	<i>Units</i>
a	0.105	m	D	0.01	
b	0.1045	m	I_c	0.2801	$kg\ m^2$
d	0.01	m	I_m	4.96e-4	$kg\ m^2$
l_s	0.1	m	I_w	3.75e-4	$kg\ m^2$
l_{ts}	0.3	m	J	0.9363	Nm/s^2
r_p	0.025	m	m_c	16.9	kg
r_w	0.02	m	m_w	0.3	kg

실제 격자형 용접 라인을 고려하여 직선 라인 시뮬레이션을 위해서 Fig. 10(b)에서 나타낸 것처럼 $x = 255 \text{ mm}$ 로 설정하였다. 로봇의 초기 위치는 $(x_c, y_c) = (257 \text{ mm}, 0 \text{ mm})$ 로 설정하였고, 로봇의 헤딩각은 $\phi = 80^\circ$ 로 설정하였다. 그리고, 주행 로봇의 전원을 켜면 토치 슬라이더의 길이는 항상 $x_b = 175 \text{ mm}$ 로 초기화 되게 프로그램 되어있기 때문에 주행 로봇의 초기 위치와 헤딩각 및 토치 슬라이더의 길이에 의해 용접선 추적 센서의 길이는 $x_s = \left\{ \frac{257}{\cos(80^\circ)} - x_b \right\} = 85.964 \text{ mm}$ 로 설정됨을 알 수 있다. 일반적으로 용접 모재의 소재에 따라 용접 전류 및 속도가 결정되어지는데, 산업현장에서 품질 높은 용접 비드(welding bead)를 얻기 위해서 용접 속도를 약 7.5 mm/s 로 설정한다. 따라서, 본 시스템에서도 기준 용접 속도를 앞에와 같이 설정하였다.

선회 제어 시뮬레이션에서, 주행 로봇이 선회 시 한 점에서 회전을 한다고 가정을 하였기 때문에 주행 로봇의 전 방향 속도는 0(zero)이다. 선회 시 용접 속도를 $v_{weld} = 7.5 \text{ mm/s}$ 로 설정하였고, 로봇이 직선 주행 시 추종이 잘되었다는 가정 하에 선회 시 로봇의 초기 위치와 헤딩각을 각각 $x = 255 \text{ mm}$ 및 $\phi = 90^\circ$ 로 설정하였다. 따라서, 식 (4.17)에 의해 주행 로봇의 기준 각속도를 시간의 함수로 계산할 수 있다. 그리고, 초기 토치 슬라이더의 위치는 $x_b = 175 \text{ mm}$ 로 설정하였다. Table 2에는 주행 로봇의 시뮬레이션 및 실험을 위한 모든 파라미터(parameters)의 초기 값 및 게인 값(gain values)을 나타내었다.

Table 2 Condition values for simulation and experiment

	<i>Straight locomotion</i>	<i>Turning locomotion</i>
· Initial (x_c, y_c)	$(x_c, y_c) = (257 \text{ mm}, 0 \text{ mm})$	$(x_c, y_c) = (255 \text{ mm}, 0 \text{ mm})$
· Initial v_c	$v_c = 0 \text{ mm/s}$	$v_c = 0 \text{ mm/s}$
· Initial ϕ	$\phi = 80^\circ$	$\phi = 80^\circ$
· Initial x_s	$x_s = 175 \text{ mm}$	$x_s = 175 \text{ mm}$
· Initial x_s	$x_s = 85.964 \text{ mm}$	$x_s = 80 \text{ mm}$
· Output equation	$h_s(x) = x_s,$ $h_{\rho_1}(q) = (x_c - 255),$ $h_{\rho_2}(\eta) = \frac{r_w}{2} (\eta_1 + \eta_2)$	$h_s(x) = x_s,$ $h_p(x) = \dot{\phi}$
· 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	$K_P = 2.5, K_{D_i} = 2.95$	$K_P = 10, K_{D_i} = 100$
· Gain for the torch slider	$K_P = 1700, K_{I_i} = 0.1,$ $K_{D_i} = 690$	$K_P = 1700, K_{I_i} = 0.1,$ $K_{D_i} = 690$
· Sampling time	$\Delta T = 0.01 \text{ s}$	$\Delta T = 0.01 \text{ s}$

5.2 실험 장치

본 논문에서는 Photo 5와 같은 격자형 모재를 실험장치로 선정하였으며, 실제 조선소의 격자형 모재 보다는 약간 큰 사이즈로 설계되었지만, 형태는 동일한 구조로 설계 제작하였다. 격자형 모재의 재료는 두께

4mm의 Mild Steel를 이용하여 제작하였으며, 가로 및 세로의 각 길이는 2m×3m 이다.

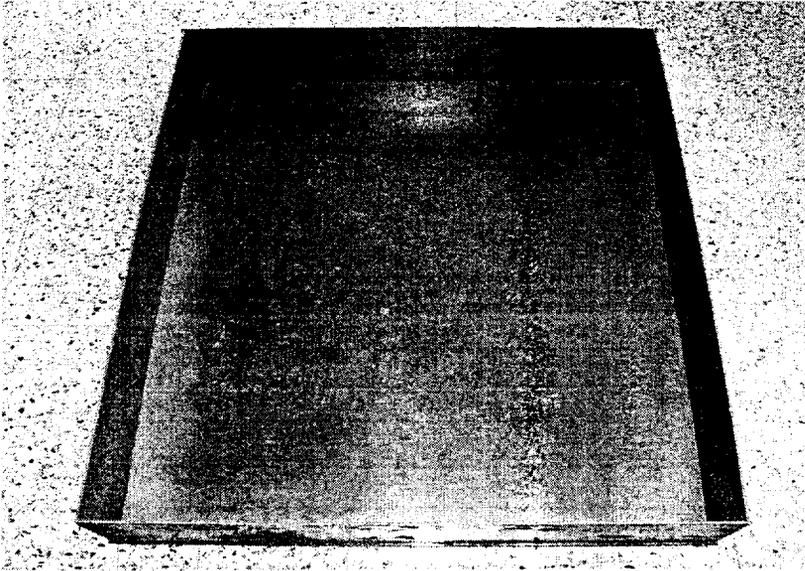


Photo 5 Work-piece for welding

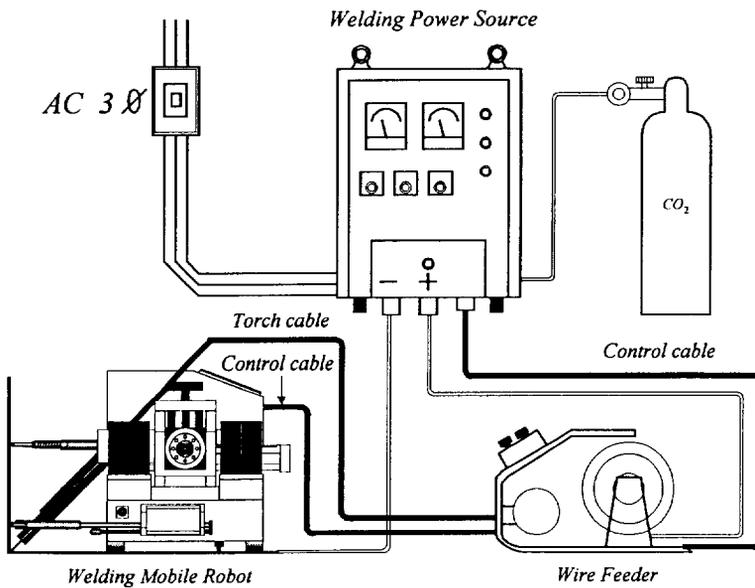


Fig. 8 Composition of welding system

Table 3 Experimental condition of welding system

	<i>Condition</i>
<i>Work Piece</i>	<i>Mild Steel 4mm</i>
<i>Welding Wire</i>	<i>φ1.4 Flux Cored Wire</i>
<i>Welding Current</i>	<i>220A</i>
<i>Welding Voltage</i>	<i>25V</i>
<i>Sliding Gas</i>	<i>18 l/min CO₂</i>

본 연구에서 개발된 주행 로봇의 용접 성능을 시험하기 위해 Fig. 8 과 같이 용접 시스템을 구성하였다. 그리고, 용접 시스템에 구성되어 있는 용접 조건 및 세부 사항을 Table 3에 정리하였다.

5.3 격자형 주행 로봇의 실험 공정

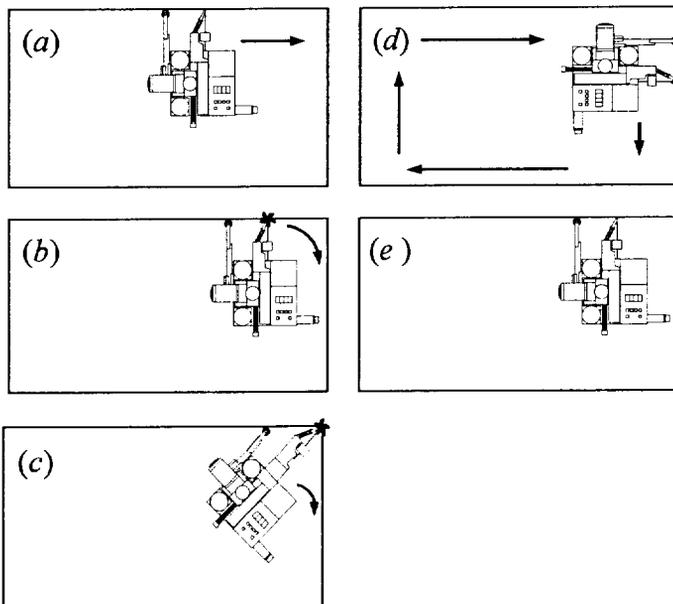


Fig. 9 The diagram of operating concept for a welding cycle

Fig. 9는 격자형 용접 주행 로봇을 격자 내에 투입했을 때 로봇이 작업을 수행하는 과정을 나타낸다. 로봇의 전원을 켜기 전에 로봇을 필렛 상판 철판에 용접 라인 추적 센서와 자세 보정 센서가 감지 될 수 있도록 임의의 위치에 둔다. 로봇의 전원을 켜면 토치 슬라이더 위치 센서와 리미트 센서(limit sensor)를 이용하여 설정된 토치 슬라이더의 초기 위치로 세팅이 된다. 그리고, Fig. 9(a)와 같이 격자 내에 로봇을 투입하여 주행 버튼을 누르면 설정된 용접 속도 및 용접 라인을 추적하면서 용접을 행하지 않고 직선 주행을 한다. 로봇은 근접센서를 이용하여 격자의 모서리부가 감지될 때까지 주행한다.

Fig. 9(b)-(c)는 격자의 모서리부가 감지된 시점부터 선회를 행하며 설정된 용접 속도로 용접을 행하는 것을 나타낸다. 그리고, 계속 선회를 하다가 자세 보정 센서와 토치 슬라이더 위치 센서 값이 초기의 값과 같게되는 시점에서 격자의 모서리부 용접을 완료한 것으로 판단하고 다시 직선 부 용접을 하는 것을 나타낸다.

Fig. 9(d)-(e)는 격자의 4변의 모든 필렛 용접을 행한 후 최초로 인식되었던 모서리부가 감지된 시점에서 모든 용접을 마친다.

5.4 결과 및 고찰

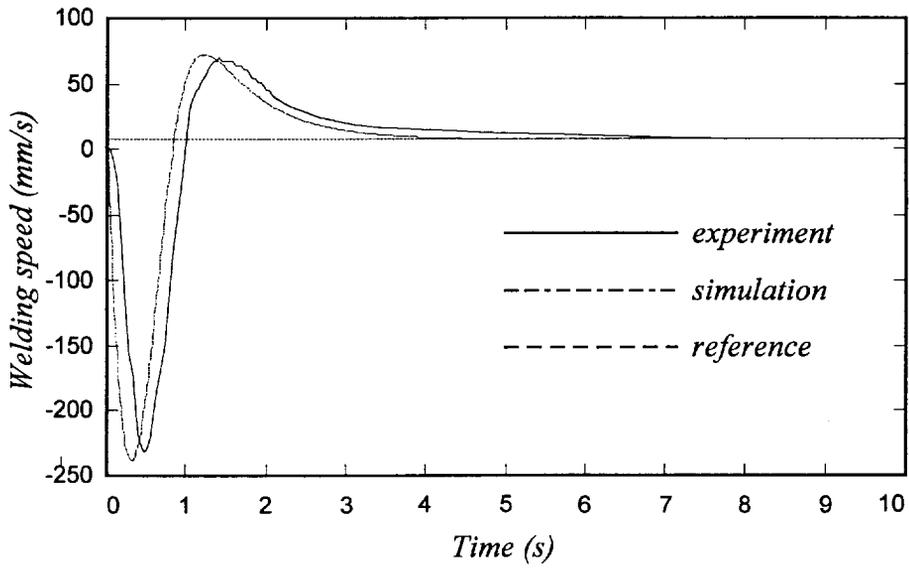
직선 및 선회에 대한 시뮬레이션 및 실험 결과는 Figs. 10-11에 나타내었다. 주행 로봇에 대한 실험 공정은 앞에서 설명했듯이 초기 위치에서 격자의 모서리부가 감지될 때까지 설정된 용접 속도 및 용접 라인을 추적하면서 용접을 행하지 않고 직선 주행한다. 근접 센서에 의해 모서리부가 감지가 되면 용접기에 토치 신호가 입력되고 용접이 진행된다.

Fig. 10(a)에는 용접 속도의 시뮬레이션 및 실험 결과를 나타내었다.

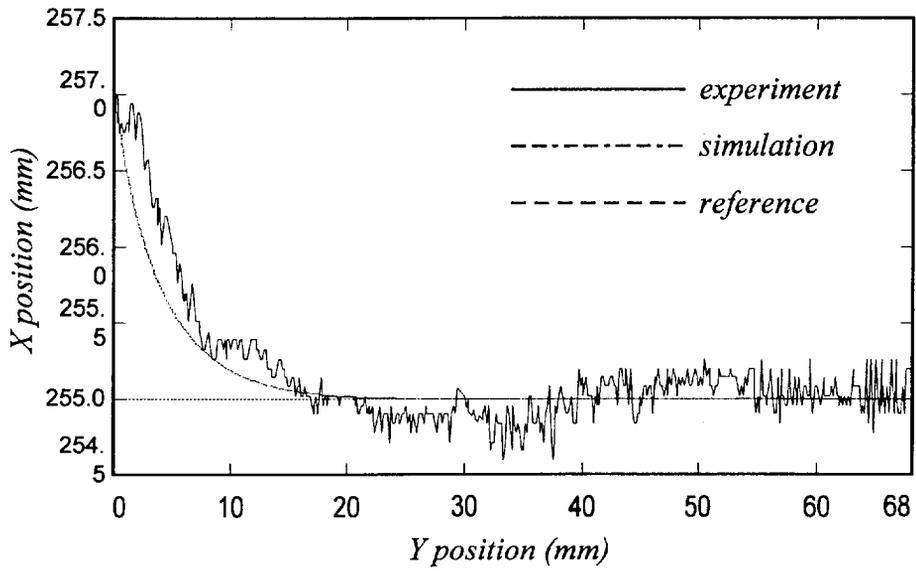
용접 속도는 초기 약 7초간의 추적 시간을 가지면서 정확히 추적됨을 볼 수 있다. 그리고, Fig. 10(b)는 주행 로봇의 위치 추적 결과를 나타내고 있으며, 약 18mm 이후 기준 위치에 잘 추종하고 있음을 나타내고 있다. 또한, Fig. 10(d)는 토치의 위치를 제어하기 위한 용접선 추적 센서의 위치값의 결과를 나타내고 있으며, 거의 에러(error)없이 기준 위치에 잘 추종하고 있음을 알 수 있다. 하지만, 실제 실험 결과는 시뮬레이션 결과와 달리 시스템이 외부 노이즈 및 외란에 대해 영향을 조금은 받고 있음을 실험 결과를 통해서 알 수 있다.

격자형 용접 주행 로봇의 선회 제어에 대한 시뮬레이션 및 실험 결과는 Fig. 11에 나타내었다. 선회 시에는 주행 로봇의 전 방향 속도가 0(zero)이고, 한 점에서 선회한다는 가정 하에 시뮬레이션이 수행되었고, 실제 실험 결과에서도 거의 동일한 결과를 나타내었다. 주행 로봇에 Fig. 11(b)와 같은 기준 각속도 입력을 주었을 때 매우 빠른 응답속도 및 정확하게 추종하고 있음을 알 수 있다. 이에 따라, Fig. 11(a)에 나타낸 주행 로봇의 용접 속도 추종 결과는 매우 정확히 추종하고 있음을 나타내고 있다. 또한, Fig. 11(d)에 나타낸 용접선 추적 센서의 위치, 즉 토치의 위치는 최대 약 0.4mm 의 오차(error)를 가지고 용접 라인을 추종하고 있음을 나타내고 있다. 하지만, 이 오차의 크기가 매우 작기 때문에 용접 품질에 영향을 미치지 않는 것이다.

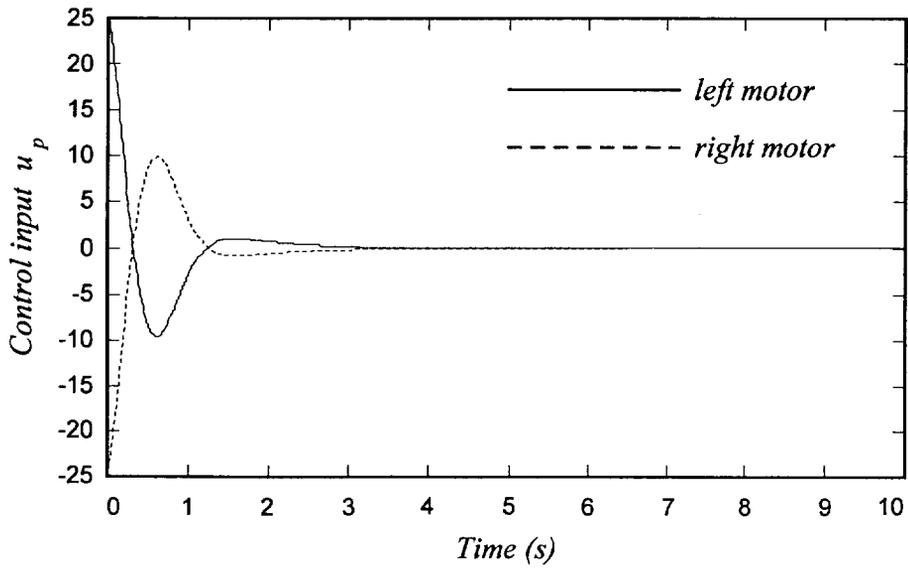
시뮬레이션 결과에서 얻을 수 있었던 로봇에 대한 모든 파라미터(parameters)의 상태를 실험 결과에서는 모든 파라미터에 대한 상태를 얻을 수 없었으며, 용접 속도, 로봇의 위치, 용접선 추적 센서의 위치, 각속도의 상태만을 얻을 수 있었다.



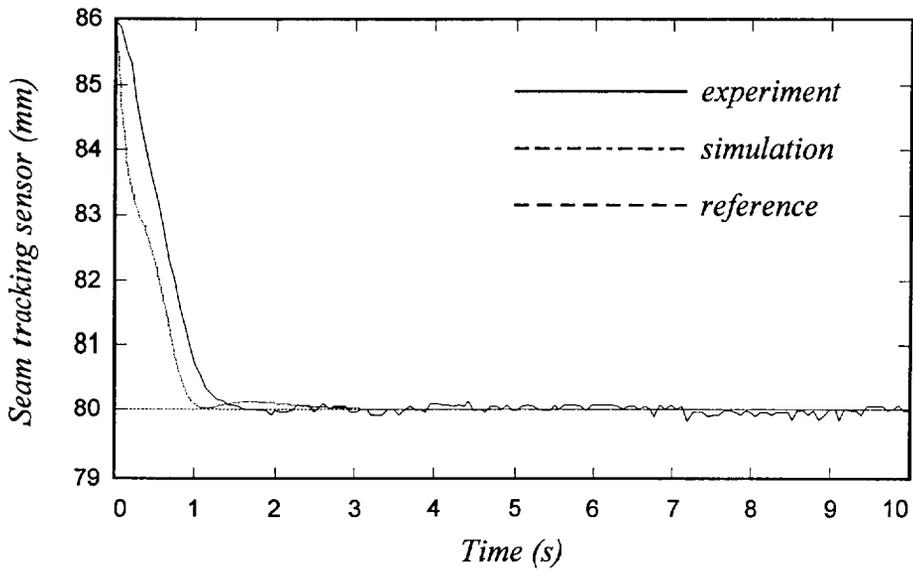
(a) The welding speed v_{weld}



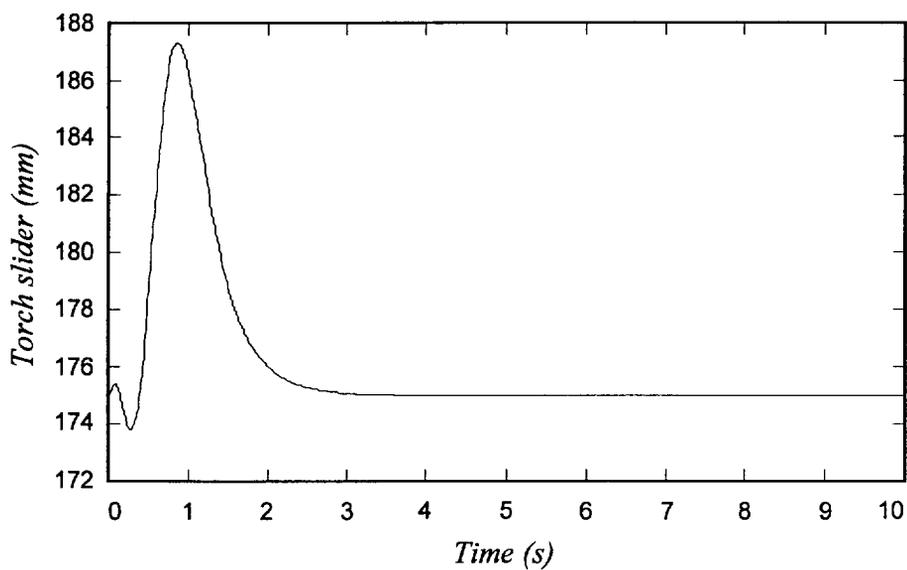
(b) The position of mobile robot x_c



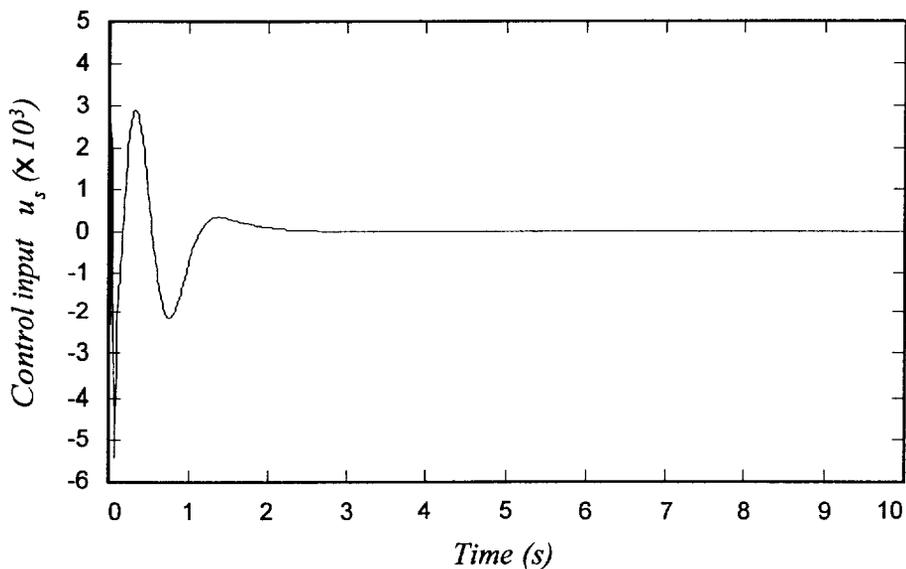
(c) Control input for the mobile robot u_p



(d) Distance of the seam tracking sensor x_s

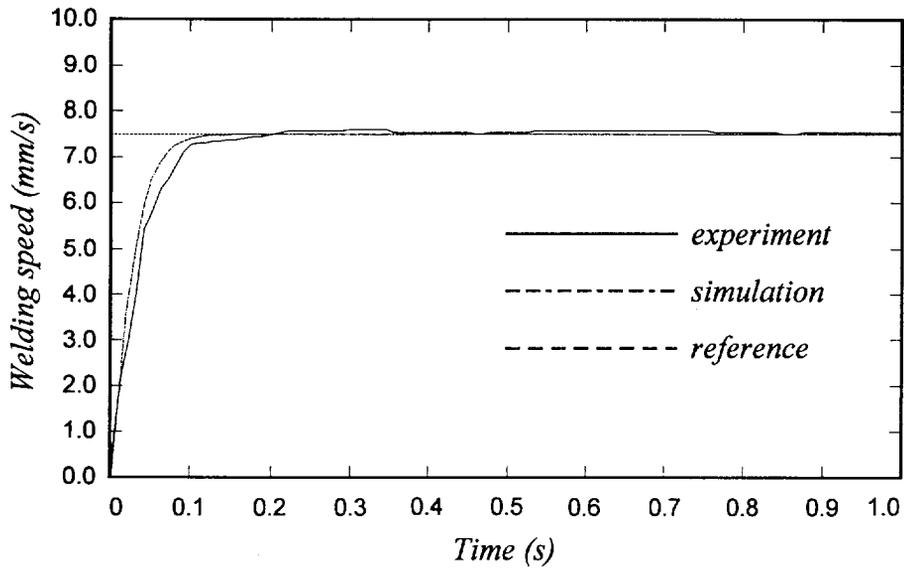


(e) Distance of the torch slider x_{ts}

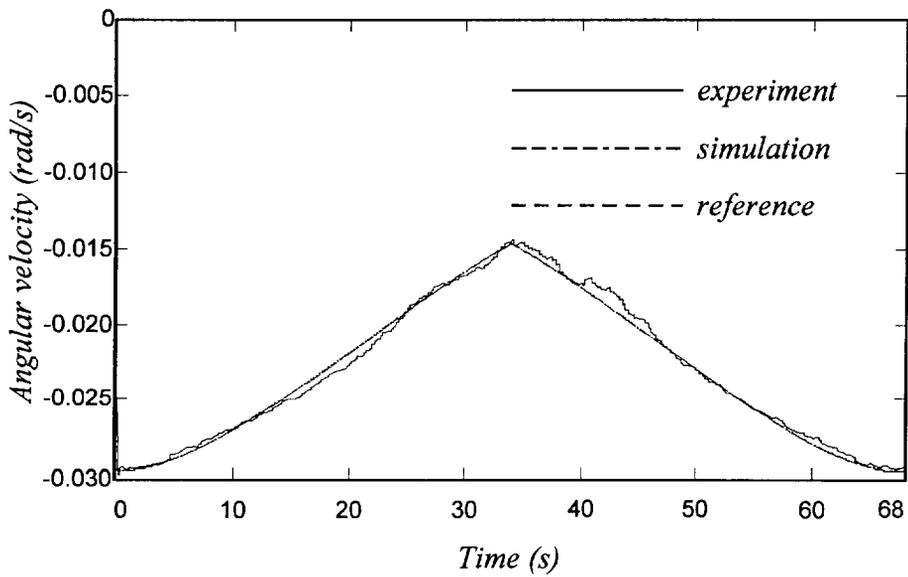


(f) Control input for the torch slider u_s

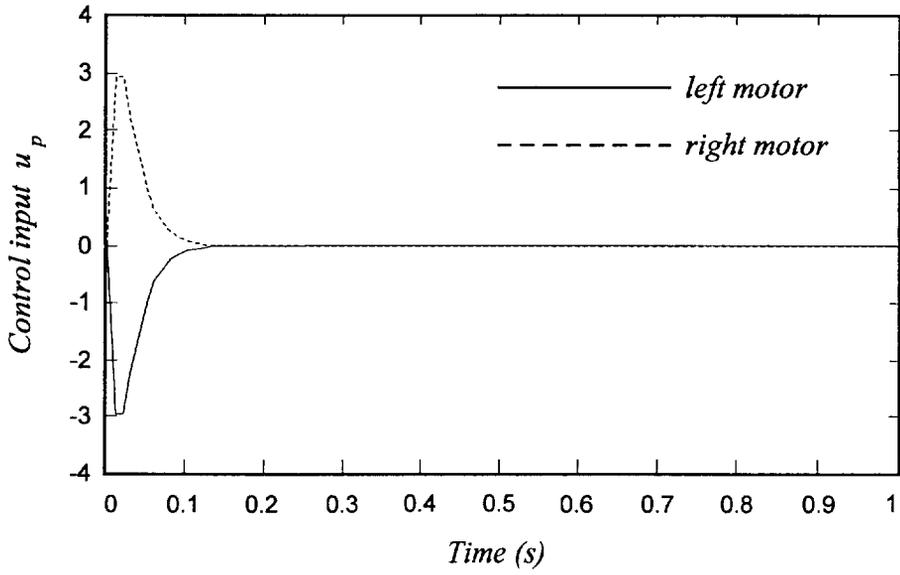
Fig. 10 Experimental results of straight locomotion



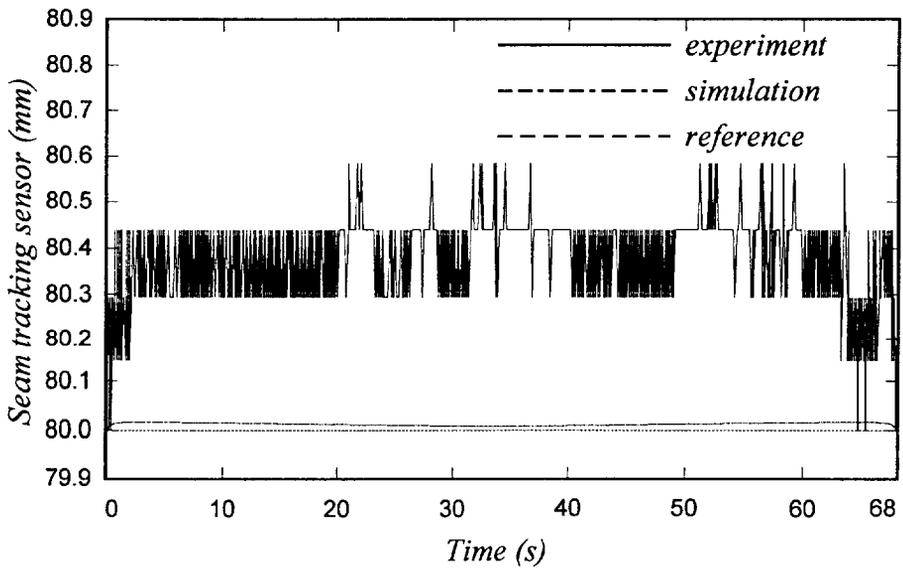
(a) The welding speed v_{weld}



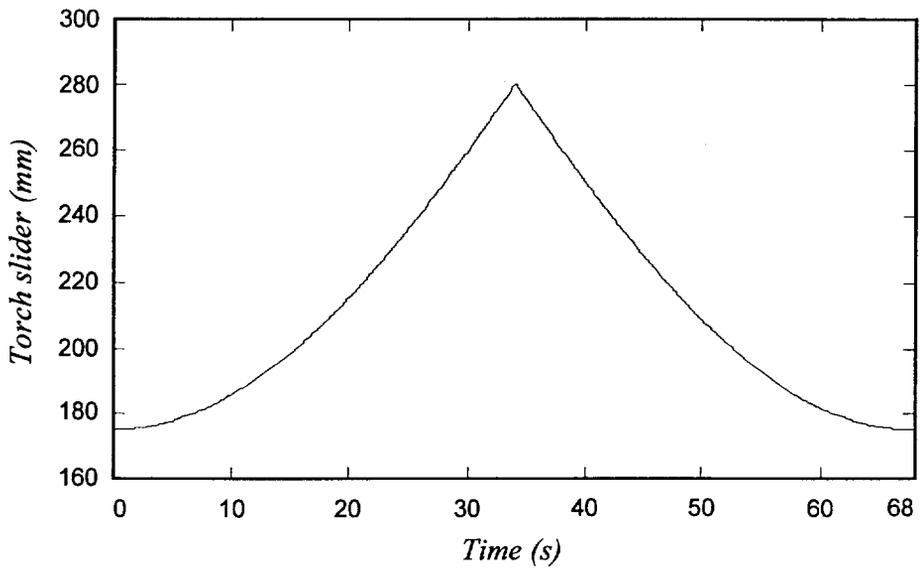
(b) The angular velocity of mobile robot $\dot{\phi}$



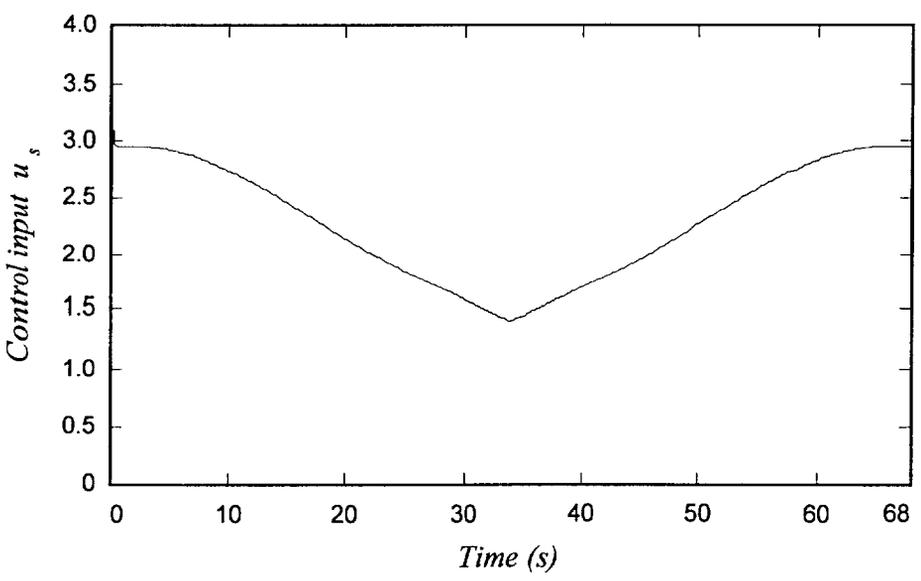
(c) Control input for the mobile robot u_p



(d) Distance of the seam tracking sensor x_s



(e) Distance of the torch slider x_{ts}



(f) Control input for the torch slider u_s

Fig. 11 Experimental results of turning locomotion

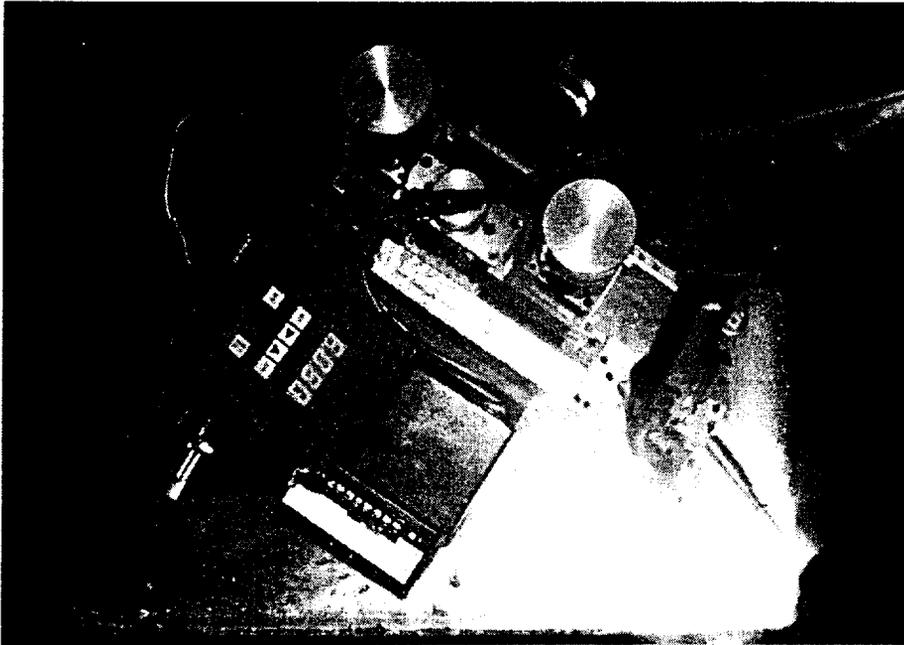


Photo 6 Experimental scene of mobile robot

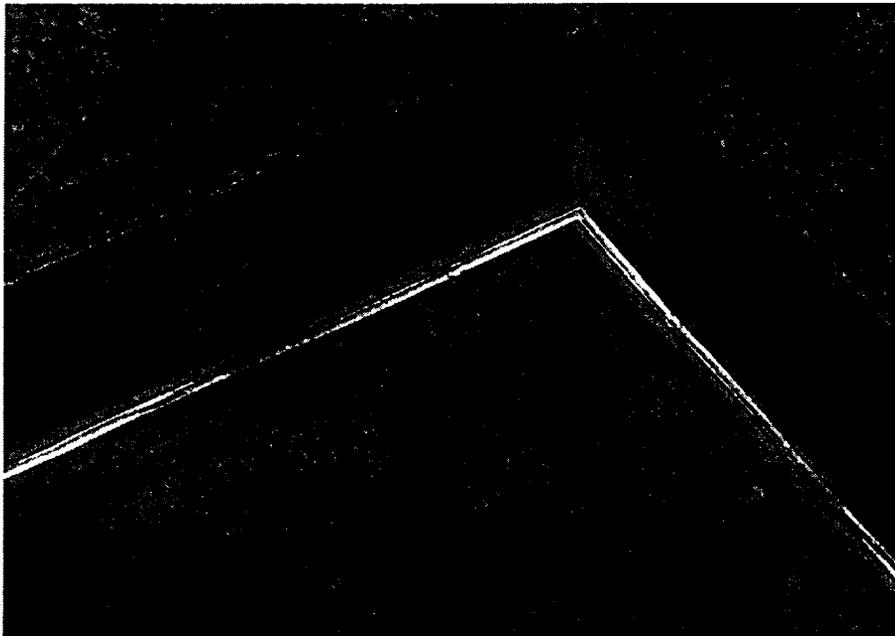


Photo 7 Welding bead of Experiment

Photo 6은 격자형 용접 주행 로봇을 실제 격자형 라인에 투입하여 용접하고 있는 장면을 나타낸 사진이다. 주행 로봇이 격자형의 모서리부를 용접하고 있으며, Photo 7은 주행 로봇이 용접한 용접 비드를 나타내고 있으며, 용접 비드의 품질은 매우 우수한 것으로 나타내었다.

제 6 장 결 론

본 논문에서는 직선 및 격자형 용접 라인을 모두 용접할 수 있는 용접 주행 로봇의 모델링 및 그 제어기 설계법을 제안하였다.

용접 주행 로봇의 모델링은 nonholonomic 구속조건 아래 Lagrange 방정식을 이용하여 운동 방정식을 구하였다. 그리고, Lagrange multipliers를 소거하고, 용접 속도에 대한 동역학을 구하여 용접 주행 로봇의 모든 상태방정식을 구하였다.

주행 로봇의 제어는 직선 주행과 선회 제어에 따라 제어기를 분리하여 제안하였고, 용접 속도를 일정하게 유지하는 관점에서 제어기를 설계하였다. 직선 주행 제어는 nonlinear 상태 피드백과 주행 로봇에 대한 디커플링 행렬(decoupling matrix)을 구하여 수행하였으며, 선회 제어는 주행 로봇이 선회 시 용접 속도와 주행 로봇의 각속도와의 관계 방정식을 구하여 수행하였다. 그리고, 토치 슬라이더의 용접선 추적 제어는 PID 제어기를 설계하여 수행하였다.

주행 로봇에 대한 시스템을 실제 현장에 적용할 수 있도록 원칩 마이크로 프로세서인 80C196KC-20과 DSP인 TMS320C32-PCM50을 이용하여 구현하였다. 제안한 제어기의 연산 처리 부분을 DSP에서 수행하고, 연산 처리된 데이터를 이용하여 실제 시스템을 제어하는 부분을 마이크로 프로세서가 수행하였다. 실험은 격자형 용접 라인을 제작하여 실제 용접을 수행하였다. 직선 및 선회 제어에 대해 제안한 각 제어기의 성능 실험의 결과는 목표치에 잘 추종하고 있음을 확인할 수 있었다.

본 시스템을 실제 현장에 투입함으로써 야기될 수 있는 많은 문제점을 해결하는 것이 앞으로의 과제이다.

참 고 문 헌

- [1] Jeon, Y. B., Kam, B. O., Park, S. S. and Kim, S. B., "Seam Tracking and Welding Speed Control of Mobile Robot for Lattice Type Welding", *2001 IEEE International Symposium on Industrial Electronics Proceedings, Paradise Hotel, Pusan, Korea*, pp.857-862, 2001
- [2] Jeon, Y. B., Kam, B. O., Park, S. S. and Kim, S. B., "Motion Control of Mobile Robot for Lattice Type Welding", *ASIAR 2001, Proceedings of the Second Asian Symposium on Industrial Automation and Robotics, Bangkok, Thailand*, pp.156-161, 2001
- [3] Kam, B. O., Jeon, Y. B. and Kim, S. B., "Motion Control of Two-Wheeled Welding Mobile Robot with Seam Tracking Sensor", *2001 IEEE International Symposium on Industrial Electronics Proceedings, Paradise Hotel, Pusan, Korea*, pp.851-856, 2001
- [4] Kang, C. J., Jeon, Y. B., Kam, B. O. and Kim, S. B., "Development of Continuous/Intermittent Welding Mobile Robot", *Proceeding of the national meeting of Autumn, The Korean Welding Society*, Vol. 36, pp. 31~33, 2000
- [5] Kang, J. G., Jin, T. S., Kim, M. G. and Lee, J. M., "Optimal Configuration Control for a Mobile Manipulator", *KSME International Journal*, pp. 605~621, 2000
- [6] Chung, J. H. and Hong, D. H., "Comparative Study of Tracking Control for a Mobile Manipulator : Nonholonomic and Dynamic

Cases", *KSME International Journal*, pp. 585~595, 1999

- [7] Chung, J. H. and Velinsky, S. A., "Robust Control of a Mobile Manipulator Dynamic Modeling Approach", *Proceedings of the American Control Conference, San Diego, California*, pp. 2435~2439, 1999
- [8] Sastry Shankar, *Nonlinear Systems Analysis, Stability, and Control*, Springer-Verlag, New York, pp. 384~448, 1999
- [9] Yamamoto, Y. and Yun, X., "Unified Analysis on Mobility and Manipulability of Mobile Manipulators", *Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol 2, pp. 1200~1206, 1999
- [10] Campion, G., Bastine, G. and dAndrea-Novel, B., "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
- [11] Fierro, R. and Lewis, F. L., "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, 1995
- [12] Sarkar, N., Yun, X. and Kumar, V., "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, 1994
- [13] Yamamoto, Y. and Yun, X., "Coordinating Locomotion and Manipulation of a Mobile Manipulator", *IEEE Transactions on*

Automatic Control, Vol. 39, No. 6, pp. 1326~1332, 1994

[14] Yun, X. and Yamamoto, Y., "Internal Dynamics of a Wheeled Mobile Robot", *Proceedings of the 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1288~1294, 1993

[15] dAndrea-Novel, B., Bastine, G. and Campion, G., "Modelling and Control of Non Holonomic Wheeled Mobile Robots", *Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1130~1135, 1991

감사의 글

본 논문이 완성되기까지 항상 지켜보면서 충고와 조언을 아끼지 않으시며 지도해 주신 지도교수님이신 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. 그리고, 항상 따뜻한 마음과 사랑을 아끼지 않으셨던 연구실 멤버 모두의 어머니이신 사모님께 이렇게 지면을 통해서나마 감사 드립니다. 논문 심사 과정에서 따끔한 질책과 아울러 격려를 아끼지 않으셨던 변기식 교수님, 최연욱 교수님께 거듭 감사의 마음을 올립니다. 또한, 학부 및 대학원을 진학하기까지 학문의 기초를 지도해 주셨던 모든 교수님들께 감사드립니다.

대학을 입학하자마자 제어공학 연구실에 입방하여 생활함에 있어서 항상 정신적인 지주가 되어 주셨던 연구실 선배님이신 신민생 교수님, 박사 학위 논문을 쓰신다고 바쁘신 와중에도 격려를 아끼지 않으셨던 이진우 선생님, 이충환 교수님, 김인규 선생님께 감사 드리며, 연구실 생활 및 학문을 배울 때 여러모로 많은 도움을 주셨던 김환성 교수님께 진심으로 고개 숙여 감사드립니다. 또한 올해 박사 졸업을 하시는 안휘웅 교수님, 이론적으로 어려움이 있을 때 항상 도움을 주셨던 김학경 선생님, 그리고, 졸업하셔서 직장 생활 열심히 하시는 박진선 선배님, 배경수 선배님, 유휘룡 선배님, 전봉환 선배님, 지명석 선배님, 강호원 선배님, 김제운 선배님, 한정만 선배님, 박홍수 선배님, 박장완 선배님, 이재동 선배님, 그리고, 우리 나라에서 박사학위과정을 마치고 베트남으로 귀국한 쿠엔반 잠 선생님, 베트남에서 유학을 와서 석·박사과정을 마치는 동안 많은 도움을 주신 Post Doc. 과정을 밟으로 다시 귀국한

던 선생님, 그리고 일본 동경공대에서 유학과정을 마치시려는 서진호 선배님, 구마모토 대학에서 유학 중인 여태경 선배님, 선배님들의 사랑 오래 간직하겠습니다.

CIMEC 연구실의 박사 과정에서 열심히 연구 활동 중이신 정남수 선배님, 박순실 선배님, 김광주 선생님, 김성민 선배님, 김진호 선배님, 감병오 선배님, 김동규 선배님, 이근유 선배님의 큰사랑 정말 감사합니다. 그리고, 제가 기쁠 때나 슬플 때 항상 함께 나누었던 현 연구실 멤버인 중국에서 유학오신 허철 선배님, 김석렬 선배님, 박성재 선배님, 신승목 선배님, 이영환 선배님, 베트남에서 유학 온 동료 휴님, 그리고 열심히 하시는 이원기님, 잠시나마 함께 있었던 강치정님, 항상 여러모로 많은 도움을 준 동료인 김성욱님, 광민규님, 김정민님, 이종희님, 전신희님, 최재호님 앞날에 좋은 일만 있기를 기원합니다. 부족한 저에게 많은 도움을 준 CIMEC 연구실 후배님 김정기님, 김정훈님, 김지년님, 김해영님, 임재성님, 이희숙님, 이숙례님, 김대원님, 이도경님, 그리고 군복무를 마친 98학번님들 모두에게 고마운 마음을 전합니다. 그리고, 군복무 중인 99학번, 2000학번 후배님들 제대하는 날까지 몸 건강히 잘 지내기를 바랍니다.

저를 낳으셔서 지금까지 키워주시고 뒷바라지 해주시며, 어려운 형편에도 대학에 진학하게 하시여 지금의 저를 있게 해 주신 아버지, 어머니의 은혜 진심으로 깊이 감사 드립니다. 그리고 항상 힘이 되어 주셨고, 따뜻하게 대해 주신 큰형, 작은형에게 고마움을 전합니다. 그리고, 어려울 때 항상 옆에서 힘이 되어준 애인 순미양에게 이렇게나마 고마움을 전합니다. 또한, 항상 저를 걱정해주시고 격려해주신 모든 분들께 감사의 마음을 전하며 행복을 빌어봅니다.

2001 년 12 월 26 일 전 양 배