

工學博士學位論文

격자 및 자유곡선 용접용
이동로봇의 개발

Development of Welding Mobile Robot for
Lattice and Smooth Curved Welding Line

指導教授 金相奉

이 論文을 釜慶大學校 工學部 機械工學學聯 協同課程 甘炳午 提出함



2005年 8月

釜慶大學校 大學院

機械工學學聯 協同課程

甘 炳 午

甘炳午의 工學博士 學位論文을 認准함

2003 年 6 月 25 日

主 審 工學博士 金煥成



副 審 工學博士 趙相明



委 員 工學博士 金相奉



委 員 工學博士 張志城



委 員 工學博士 徐振瑚



목 차

Abstract	1
제 1 장 서 론	7
1.1 연구배경	7
1.2 연구목표 및 연구내용	9
제 2 장 용접 이동로봇의 모델링	12
2.1 서언	12
2.2 용접 이동로봇의 구속 방정식	15
2.2.1 이륜 이동로봇의 속도 및 회전 각속도	15
2.2.2 기구학적 구속 조건	17
2.2.3 구속 방정식 유도	18
2.3 용접 이동로봇의 동력학적 운동방정식	21
2.4 격자형 용접선 추적 센서를 이용한 용접 이동로봇의 운동 해석	24
2.5 자유곡선형 용접선 추적 센서를 이용한 용접 이동로봇의 운동 해석	27
2.5.1 자유곡선형 용접선 추적 센서	27
2.5.2 오차 방정식을 이용한 자유 곡선형 용접 이동로봇의 운동 방정식	31
제 3 장 격자형 용접 이동로봇의 개발 및 제어	37
3.1 서언	37

3.2	격자형 용접 이동로봇 제어 알고리즘	41
3.2.1	용접선 추적 제어 알고리즘	41
3.2.2	이동로봇의 직선 주행 제어 알고리즘	43
3.2.3	로봇의 선회 제어 알고리즘	47
3.3	격자형 용접 이동로봇의 설계	50
3.3.1	제어 장치	52
3.3.2	구동부	54
3.3.3	용접선 추적용 토치 슬라이더	55
3.4	격자형 용접 실험 및 결과	58
3.4.1	용접 이동로봇의 용접 패턴	58
3.4.2	용접 실험결과	58
제 4 장	자유 곡선형 용접 이동로봇의 개발 및 제어	66
4.1	서언	66
4.2	Backstepping법을 이용한 제어 알고리즘	68
4.3	자유 곡선형 용접 이동로봇의 설계	74
4.3.1	제어 시스템 구성	75
4.3.2	구동 장치	79
4.3.3	용접선 추적 센서	79
4.4	모의실험 및 실험 결과	83
4.4.1	용접선 추적을 위한 모의실험 및 실험 결과	83
4.4.2	용접 실험 결과	96
제 5 장	결 론	104

Development of Welding Mobile Robot for Lattice and Smooth Curved Welding Line

Byoung-Oh Kam

University Research Interdisciplinary Program
of Mechanical Eng., Graduate School
PuKyung National University

Abstract

This dissertation is concerned to the development results of welding mobile robots to track lattice and smooth curved welding lines.

In welding process of the shipbuilding industry, ship bottom is assembled of several egg box type of blocks in order to enhance intensity. In these cases, the egg box is completed welding processes of various types such as horizontal, vertical and lattice type, and the smooth curved welding is also used to in piping hole welding of elliptical and a wall welding of a cabin. However, the welding process is very complicated and it mainly depends on human's experience. Moreover, to realize or automatic welding process, we have solve several problems such as finding a slowly start welding point, mobility, cost, miniaturization, etc in order to use welding robots of a manipulator types.

In the case of using a manipulator type of welding robot, we can not avoid from several problems such as finding a slowly start welding point, mobility, cost, miniaturization and so on, Especially, in the cases of a mobile robot for welding purposes, there is very complex problem

such that the motion control must be done in the view of keeping constant welding speed and precise target line even though the robot is driven for following lattice welding and smooth curved welding lines.

To obtain good welding bead, the welding speed must be kept constant or at least in a predefined limited range. Furthermore, the position of the mobile robot must be controlled to asymptotically converge because of limited length of torch slider. In addition, a slider of the mobile robot carrying torch must be controlled for the end of torch to be kept at the welding target line.

First, the developed welding mobile robot for lattice welding 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. Moreover, PID control method and PD control method are used for the torch slider control to seam tracking and straight and turning locomotion, respectively. Also, the straight locomotion is controlled according to eleven control patterns obtained from displacements between two sensors of the seam tracking sensor and the body positioning sensor, and the body and the torch slider are controlled by using the kinematic model related with two motions of body turning and torch sliding in turning locomotion.

Secondly, this study proposes a welding mobile robot for smooth curved welding line is also developed and proposes a nonlinear controller using backstepping method based on Lyapunov stability for tracking reference welding path and velocity.

The proposed control system is stable in the sense of Lyapunov stability. An error configuration is defined in order to design a tracking controller for the reference welding path and the proposed controller is designed to drive the error to zero as fast as possible. The developed welding mobile robot for lattice welding is composed of main controller part, driving actuator part, body posture and seam tracking sensors. The main controller is developed by using Intel 80c196kc microprocessor and

it is composed of main CPU, motor drivers for locomotion control, keypad for input of welding conditions and 7 segment displaying those values. The driving actuator part is composed of two wheels connected with bevel gear to DC motor(24V, 24W). The control system is simple in terms of hardware and programming due to its functionality based on Microchip PIC16F877in modular design. The control board is specially designed for welding mobile robot with a complicated control law, and this is the case of application. The control board integrates two PIC16F877s as either DC motor driver or general-purpose CPU which depend on specific application.

In this case, welding mobile robot is composed of two boards and three PIC16F877s in total ; two servo controllers for left wheel and right wheel control, one for main CPU. They are linked via I2C communication in which two controllers as slave and main CPU as master are used.

The effectiveness of this researches is proven through the simulation and the experimental results for lattice type welding path and a smooth curved reference welding path, respectively. In these results, we can see that the position value of the electrode end point and the welding speed are controlled almost constantly both in straight and turning locomotion. Moreover, it is shown that the controller can be used for the control of welding mobile robot with good performances.

The developed welding mobile robots for lattice and the smooth curved welding should be used widely in the fields such as shipbuilding and assembly process. Especially, it the will be expected that seam tracking sensor can be used for other automations including welding automation. In the future works, the welding mobile robot can implement welding, evaluations of welding quality and diagnosis of welding quality. Moreover, an intelligent welding mobile robot for cooperative automations will also be developed for the future.

Nomenclature

- b : distance between driving wheel and symmetry axis [mm]
- d : and mass center of mobile robot: distance between [mm]
- D_l : coefficient of viscous friction of rotor on left wheel motor
- J_l : inertia moment of rotor on left wheel motor [kgmm²]
- D_r : coefficient of viscous friction of rotor on right wheel motor
- J_r : inertia moment of rotor on right wheel motor [kgmm²]
- D_t : coefficient of viscous friction of rotor on torch slider motor
- J_t : inertia moment of rotor on torch slider motor [kgmm²]
- K_{DP} : derivative gain for the mobile robot at straight motion
- K_{PP} : proportional gain for the mobile robot at straight motion
- K_{DS} : derivative gain for the torch slider
- K_{PS} : proportional gain for the torch slider
- K_{IS} : integral gain for the torch slider
- K_{DT} : derivative gain for the mobile robot at turning motion
- K_{PT} : proportional gain for the mobile robot at turning motion
- P_c : mass center of the mobile robot with coordinates (x_c, y_c)
- P_0 : geometric center with coordinates (x_o, y_o) , that is the intersection between symmetry and the driving wheel axis

r : radius of wheels [mm]
 r_p : radius of pinion [mm]
 u_s : control input for the torch slider
 u_r : control input for the mobile robot
 v_w : welding speed [mm/sec]
 V_c : velocity of mobile robot mass center point [mm/sec]
 V_0 : velocity of mobile robot center point [mm/sec]
 ϕ : angle between the absolute X axis and the forward direction of mobile robot [rad]
 Φ_c : angular velocity of mobile robot center point [rad/sec]
 x_o : initial distance between center of mobile robot and X axis [mm]
 x_s : length of the seam tracking sensor [mm]
 x_t : distance between geometric center of mobile robot and of the seam tracking end point [mm]
 x_e : distance between the seam tracking sensor and P_o [mm]
 l_e : distance between the body positioning sensor and P_o [mm]
 $X - Y$: world coordinate system
 m_c : mass of mobile robot exclude the driving wheel mass and motor rotor mass [kg]
 m_w : driving wheel mass including motor rotor [kg]

I_w : inertia moment of driving wheels and rotor of motor on driving wheel axis [kgmm²]

I_c : inertia moment of mobile robot excluding driving wheels and rotor of motor of DC motors [kgmm²]

I_m : inertia moment of driving wheels and rotor of motor on wheel diameter [kgmm²]

θ_r : rotation angle of right motor [rad]

θ_l : rotation angle of left motor [rad]

θ_t : shaft angle of torch slider motor [rad]

τ_r : torque acting on the right wheel [kgmm]

τ_l : torque acting on the left wheel [kgmm]

τ_t : torque acting on the torch slider [kgmm]

λ_i : Lagrangian multipliers

제 1 장

서 론

1.1 연구배경

20세기 후반에 들어서면서 고임금으로 인한 원가상승과 인력난 및 품질관리와 생산성 저하 등의 문제를 해결하기 위해 선산업 분야에서 생산자동화에 대한 요구가 급증하고 있으며 특히, 인간이 접근하기 곤란하거나 유해한 작업 환경에서 인간을 대신하여 주어진 임무를 수행할 수 있는 이동로봇의 필요성이 날로 증가되고 있고, 현재에도 이에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다¹⁾. 이러한 연구 활동 중에서도, 특히 작업 환경이 열악한 조선 공장 및 철구조물 조립공정에서 모재 공간을 자유롭게 이동하며 용접할 수 있는 이동로봇의 수요가 급증하고 있는 실정이다.

조립공정의 핵심기술이라고 할 수 있는 용접공정은 조선분야를 포함한 항공기, 자동차, 해양구조물, 철도차량, 교량, 압력용기, 저장탱크, 발전설비, 원자로, 가전용품 및 정밀 전자산업분야 등에 이르기까지 수많은 조립공정에서 가장 핵심적인 기반 기술이다²⁾. 그러나 용접 중에 발생하는 유해가스, 아크광, 소음, 분진, 흠(fume) 등으로 인하여 용접공정의 작업환경은 매우 열악한 것이 현실이다. 더구나 수작업 용접시 작업자의 숙련된 기능의 정도에 따라 용접 품질이 결정되기 때문에 지속적으로 안정된 품질관리와 생산성 향상에 한계가 있다. 더구나, 용접공정은 조립공정의 중요한 기반기술이므로 생산성을 높이고 안정적인 품질관리를 위해서는 합리적인 공정 개발과 더불어 용접 자동화가 필요 불

가결한 과제이다.

최근 들어 용접 공정의 합리화와 자동화를 실현하기 위하여, 마이크로프로세서를 이용한 다양한 형태의 용접공정 자동화 및 무인화에 대한 연구·개발이 활발히 진행되고 있으며, 실제로 용접공정의 현장에서 그 적용범위도 더욱 확대되고 있다. 이러한 용접 자동화의 형태는 1) **전용 매니플레이터를 이용한 자동화**, 2) **다관절 로봇을 이용한 자동화** 3) **이동로봇을 이용한 자동화**로 나누어 질 수 있다. 먼저 전용 매니플레이터를 이용한 용접 자동화의 경우에는 모재 형상에 따라 매니플레이터를 특별히 설계·제작한 것으로서 소품종 다량 생산의 용접공정에 적절한 자동화 형태이다. 그러나 전용 매니플레이터를 이용할 경우 작업 공정의 유연성이 낮기 때문에 공정의 변화에 능동적인 대처가 곤란한 단점을 가지고 있으므로 다품종 소량생산 형태의 공정에서는 부적합한 용접 자동화 형태라고 할 수 있다.

다관절 로봇을 이용한 용접 자동화에서는 공정 변경에 따른 작업 유연성이 우수하기 때문에 다품종 소량 생산의 용접 공정에서 유용한 용접 자동화 형태이지만 설비 및 자동화에 따른 유지 보수비용이 높다는 단점이 있다.

이동로봇을 이용한 용접 자동화는 모재가 대형인 조선 공정이나 대형 철구조물 조립 공정에 적용된다. 이동로봇은 넓은 모재 공간에서 자유롭게 이동하며 용접 작업을 수행하여야 하므로 용접선 추적과 이동로봇의 자세 및 속도 제어가 필수적이다. 현재 조선 공정이나 대형의 철구조물 조립 공정에서 격자형 용접이나 자유곡선형 용접은 인력에 의존하고 있는 실정이므로 이에 대한 자동화가 시급히 요구된다.

해상 사고로 선체가 파손될 경우 해상 오염을 방지하기 위해 대형 선박의 선저는 이중 구조로 제작되는데 이러한 구조는 많은 격자형 용

접부를 발생시킨다. 현재, 이러한 격자형 용접부는 오토 캐리지(auto carriage)나 갠트리 로봇(gantry robot)을 이용하여 격자의 직선부를 자동 용접할 수 있지만 격자형의 모서리 부분은 숙련공에 의존하는 실정이다. 따라서 격자형 용접의 직선부와 격자의 모서리부를 연속적으로 용접할 수 있는 이동로봇이 절실히 요구되어지고 있다¹³⁾.

또한 자유 곡선형 용접은 회전 반경이 고정되어져 있지 않고 자유롭게 변화하는 용접선을 의미하는데 소형의 가선제품 부품에서부터 자동차, 중공업, 조선, 철구조물 조립 공정 등에서 다양하게 적용되고 있는 용접 형태이다. 하지만, 이러한 곡선형 용접은 현재 인력에 의존하고 있기 때문에 자동화가 시급히 요구되는 용접공정이다. 본 논문은 이러한 연구배경을 바탕으로 연구를 진행하고자 한다.

1.2 연구목표 및 연구내용

본 논문의 연구목표는 조선 공정 및 대형 철구조물 조립공정 중에서 숙련공의 인력에 의존하고 있는 격자의 모서리부 용접과 자유곡선 용접을 위한 이동로봇 개발 및 제어를 행하는 것이다. 이를 위해 격자의 직선부와 모서리부의 용접선을 연속적으로 추적할 수 있는 격자형 용접선 추적 센서를 개발하였고, 격자형 모재 공간을 자유롭게 이동하면서 격자의 직선부와 모서리 부분을 연속적으로 용접할 수 있는 이동로봇을 개발하였다. 격자 용접을 위한 이동로봇은 nonholonomic 구속조건 하에서 Lagrange 방정식을 이용하여 모델링 하였다. 이동로봇의 운동제어는 토치 슬라이더 제어, 직선 운동 제어, 그리고 선회 운동 제어로 나누어진다. 토치 슬라이더 제어를 위해서 PID 제어기법을 사용되고, 로봇의 직선과 선회 운동 제어를 위해서는 PD 제어기법을 사용하였다.

또한 자유곡선형 용접을 위해 자유곡선형 용접선 추적 센서¹³⁾를 적용한 이동로봇을 개발하였다. 이동로봇은 용접선 추적 센서를 고려하여 모델링 되며, Lyapunov 안정성을 기초로한 backstepping법을 사용해서 비선형 제어를 설계하였다. 개발되어진 용접 이동로봇은 모의실험과 실제 용접 실험을 통하여 정밀한 용접속도 제어와 용접선 추적 성능을 확인할 수 있었다.

본 논문에서 개발되어진 용접 이동로봇은 다음과 같은 장점들을 가지고 있다.

- (1) 용접 이동로봇은 외형의 크기와 무게가 소형이므로 이동성이 우수하고 보조 장치 없이 독립주행이 가능하므로 사용자가 편리하게 사용할 수 있다.
- (2) 용접 비드는 수평, 수직 각장의 편차가 약 $\pm 0.2\text{mm}$ 인 등각장 비드를 형성한다.
- (3) 용접 속도 및 용접선 추적 성능 실험결과 안정적이고, 신뢰성 있는 용접선 추적 성능을 얻었다.

본 논문은 총 5장으로 구성되며, 각 장을 아래와 같이 간단히 소개한다.

제 1 장에서는 연구배경 및 목표와 연구내용에 대해 기술하였다.

제 2 장에서는 개발되어질 용접 이동로봇의 일반적인 구속조건 및 용접선 추적 센서를 고려한 용접 이동로봇의 모델링을 나타낸다.

제 3 장에서는 격자형 용접의 직선부와 모서리부를 연속적으로 용접할 수 있는 용접선 추적 센서 및 이동로봇의 개발 내용과 그에 대한 제

어 알고리즘을 나타내며, 또한 실제 용접 실험결과를 나타낸다.

이동로봇의 용접선 추적 제어 실험 결과, 격자의 직선부와 모서리부 용접선에서 정밀하게 용접선을 추적하였으며 또한 일정 용접 속도 제어를 실현한 결과를 나타낸다.

제 4 장에서는 자유 곡선형 용접선 추적 센서¹¹⁾를 적용한 이동로봇의 개발 내용과 backstepping 제어기법을 이용하여 설계한 제어기를 보인다. 모의실험을 통해 설계한 제어기의 성능을 평가하였고, 실제 용접 실험을 통해 용접속도 및 용접선 추적 성능을 나타낸다.

제 5 장은 결론으로 본 연구에서 얻은 결론과 전망에 대해 기술한다.

제 2 장

용접 이동로봇의 모델링

2.1 서언

이륜형 이동로봇은 nonholonomic 구속조건을 가지는 것으로 잘 알려져 있는 시스템이다. 이것은 기구학적 구속방정식들을 적분할 수 없다는 특징이 있다. 이러한 제약들은 구속방정식 좌표를 간소화할 수 없기 때문에 기구학적, 동력학적 해석과 시스템 모델링에 많은 어려움이 있다. 더구나 용접 이동로봇은 목표 경로 추적 능력 외에도 목표 경로에서 일정 속도 제어를 행해야 하는 특수한 조건을 가지고 있다.

현재 많은 연구자들이 nonholonomic 구속조건을 가지는 이륜형 이동로봇에 대한 연구를 활발히 진행하고 있는데, G. Campion의 이륜 이동로봇 모델링이 널리 알려져 있다^[5]. Y. Yamamoto는 이륜 이동로봇에 매니플레이터가 탑재된 시스템에 대한 연구를 보고하였다^[6]. G. Chung은 모델링 오차를 없애기 위해 다이나믹 모델링을 이용하여 로버스트 제어(robust control) 및 적응 제어(adaptive control)를 보고하였다^[7]. N. Sarkar는 라그랑제 안정성을 보증하는 비선형 피드백 제어법을 제시하였으며, 이들은 직선 및 원형 두 가지의 목표 경로를 추적하였다^[8]. R. Fierro는 Lyapunov 안전성 이론을 기반으로 한 backstepping 기법을 이용하여 nonholonomic 이동로봇의 동력학적 모델을 해석하고 운동역학적 제어기와 토크 제어기를 통합시킨 형태의 제어기를 설계하였다^[9].

최근, T. Fukao는 이륜 이동로봇의 적응 제어 알고리즘을 제시하였

는데, 이 연구에서는 전체 시스템의 운동력학적 파라미터에서 미지의 파라미터를 가지는 이동로봇을 모델링하고 해석하였다^[10].

T. H. Bui는 이륜 이동로봇을 비선형 모델링하고 적응제어기를 설계하여, 용접 이동로봇의 용접선 추적에 관한 내용을 발표하였다^[4]. Y. B. Jeon은 격자형 용접을 위한 이동로봇을 모델링하고, PID 제어기를 설계하여 모의실험한 결과를 발표하였다^[11].

이동로봇의 주행 제어를 위해서는 자율적으로 목표 경로를 주행할 수 있는 정보가 필요한데, 이러한 정보를 획득하는 방법은 여러 연구자들에 의해 다양하게 소개되어지고 있다. 이러한 여러 방법들 중에서 대표적인 방법을 요약하면 다음과 같다^[12, 13, 14].

- (1) 초음파 센서를 이용하여 주위 환경 정보를 획득하는 방법
- (2) CCD 카메라를 이용하여 영상정보를 획득하는 방법
- (3) GPS(Global positioning system)를 이용하는 방법

용접을 위한 이동로봇은 고열과 분진이 많은 환경 속에서 목표 경로인 용접선을 추적해야 한다. 또한 목표 경로에서 일정한 속도로 주행해야 하는 특수한 조건을 가지고 있다. 따라서 용접을 위한 이동로봇의 주행 제어를 위해서는 용접 속도를 일정하게 제어하면서 목표 경로인 용접선을 추적하는 것이 중요한 과제이다. 아울러 내구성 및 내열성이 요구된다. 용접선을 추적하기 위한 센서의 형태는 크게 1) 접촉식과 2)비접촉식으로 나눌 수 있다. 비접촉식 용접선 추적 방법에는 용접 중 발생하는 아크 전압이나, 아크 전류를 계측하여 용접선을 추적하는 방식과 용접선을 감지하기 위한 비접촉식 센서를 이용한 방법으로 나눌 수 있다. 전자의 경우는 아크 전압, 전류를 계측하여 용접선을 추적하는 아

크 센서 방법과, 용접 전극을 고속으로 회전시키면서, 용접선을 추적하는 고속회전 아크 센서 방식이 있다^[15, 16]. 후자의 경우에는 레이저 비전 시스템을 이용하는 방법^[17, 18]과 초음파 센서를 이용하는 방법^[19, 20], 이중 전자기 센서^[21]를 이용한 방법이 있다. 이와 같은 비접촉식 용접선 추적 센서는 장비가격이 고가이고, 또한 구조가 상당히 복잡하므로 분진과, 고열이 발생하는 용접 환경에서 오염 및 파손의 우려가 높다. 용접 공정 중 발생하는 고열은 초음파 센서 및 비전 시스템에 악영향을 미칠 수 있으므로 용접선 추적을 위한 정확한 정보 획득을 위해 냉각 장치, 방진 장치 및 노이즈 필터 등과 같은 부가적인 외부 장치가 필요하며, 중량이 크다는 단점이 있다. 따라서 모재 공간을 이동하면서 용접을 수행해야 하는 용접 이동로봇의 용접선 추적 센서로서 비접촉식 센서는 적용상에 많은 문제점이 있다.

접촉식 센서는 용접선을 기계적인 방법으로 접촉하면서 용접선을 추적하는 방법^[1]인데 구조가 간단하며 내구성이 우수할 뿐만 아니라 저렴한 가격으로 현장 적용성 및 경량이므로 작업성이 우수하다. 본 본문에서는 격자형 용접부의 직선부와 모서리부를 연속적으로 용접할 수 있는 접촉식 센서를 개발하였으며, 또한 자유 곡선형 용접을 위한 접촉식 센서^[4]를 적용하여 모재 공간을 이동하면서 용접선을 추적하는 이동로봇을 개발하였다.

본 장에서는 이륜 이동로봇의 일반적인 구속조건과 격자형 용접선 추적 센서 및 자유곡선형 용접선 추적 센서를 고려하여 용접 이동로봇을 모델링한 내용과 용접점에서의 속도와 이동로봇의 속도 관계를 해석한 내용을 기술한다.

2.2 용접 이동로봇의 구속 방정식

2.2.1 이론 이동로봇의 속도 및 회전 각속도

Fig. 2. 1은 이동로봇의 모델링을 위해 로봇을 기구학적으로 표현한 것이다.

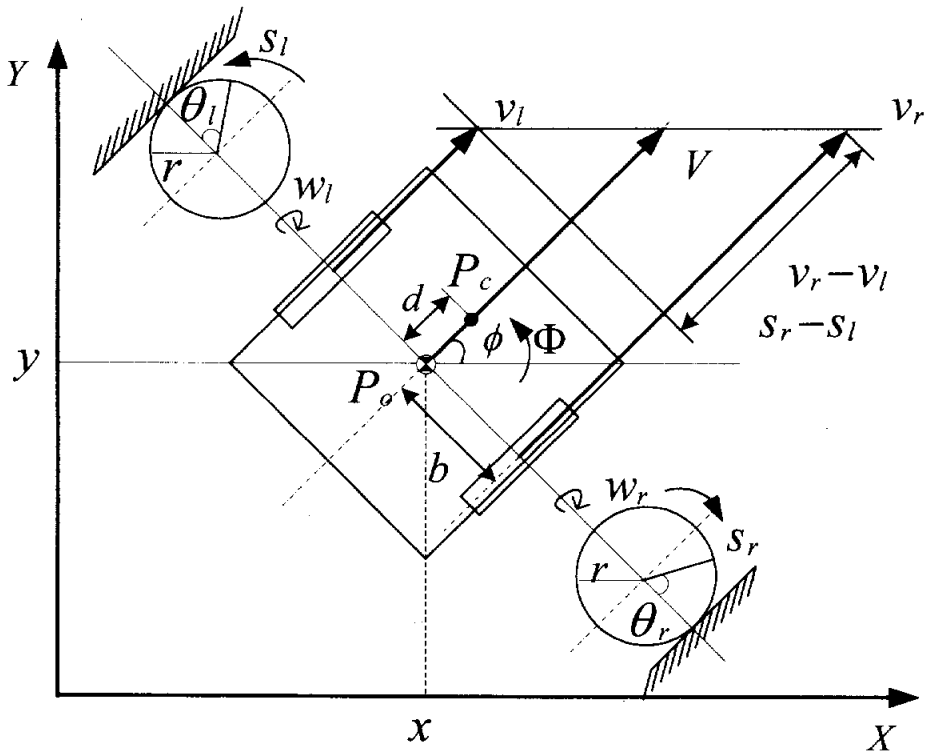


Fig. 2.1 Kinematic motion geometry of mobile robot

이동로봇 중심의 전진속도 V 와 중심에서의 회전 각속도 Φ 에 따른 좌우 구동바퀴의 회전 각속도 (ω_r, ω_l) 는 다음과 같은 관계가 있다. ϕ 는 이동로봇의 전진방향이 X 축과 이루는 각도이다.

$$V = \frac{(v_r + v_l)}{2} = \frac{r}{2} (\omega_r + \omega_l) \quad (2.1)$$

$$\Phi = \frac{r}{2b} (\omega_r - \omega_l) \quad (2.2)$$

$$\begin{bmatrix} V \\ \Phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} & \frac{r}{2} \\ \frac{r}{2b} & -\frac{r}{2b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_r \\ \omega_l \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

식(2.4)는 좌우 구동 바퀴의 회전 각속도 (ω_r, ω_l) 에 따른 이동로봇 중심에서의 전진 속도 V 와 중심에서의 회전 각속도 Φ 의 관계를 나타낸 것이다.

$$\dot{\theta}(t) = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_r \\ \dot{\theta}_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_r \\ \omega_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{r} & \frac{b}{r} \\ \frac{1}{r} & -\frac{b}{r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ \Phi \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

여기서 θ_r 와 θ_l 는 각각 오른쪽, 왼쪽 구동 바퀴의 회전각이고, r 는 구동바퀴 반경, b 는 이동로봇의 중심점에서 구동바퀴까지의 거리를 나타낸다.

2.2.2 기구학적 구속 조건

이동로봇은 대표적인 nonholonomic 시스템으로서 다음과 같은 구속 조건을 가지고 있다.

[구속 조건]

- (i) 로봇은 강체로만 이루어진다.
- (ii) 로봇은 2차원 평면상에서만 이동한다.
- (iii) 로봇은 다음 2가지의 기구학적 구속조건을 가진다.

a) No slipping condition b) Pure rolling condition

a) No slipping condition

No slipping condition은 좌우 구동 바퀴와 바닥과의 접촉점에서 이동로봇의 진행방향과 수직인 방향으로의 힘의 합은 0이다. 즉 로봇은 진행 방향과 수직인 방향으로 미끄러짐이 발생하지 않는다.

이동로봇은 탑재되어져 있는 여러 장치 예를 들어 구동용 모터, 용접토치, 제어 장치 등에 의해 이동로봇의 기구적 중심과 무게 중심이 달라진다. 따라서 기구적 중심과 무게 중심까지의 거리를 d 라 할 때 no slipping condition은 식(2.5)와 같다.

만약 이동로봇의 무게 중심과 기구적 중심이 동일하다면, no slipping condition은 $\dot{y} \cos \phi - \dot{x} \sin \phi = 0$ 이 된다.

$$\dot{y} \cos \phi - \dot{x} \sin \phi - d\dot{\phi} = 0 \quad (2.5)$$

b) Pure rolling condition

바퀴가 이상적으로 구동될 때 바퀴의 구동력이 로봇의 운동에 완전히 반영된다. 즉, 바퀴와 바닥 사이에 슬립이 없다는 가정이다. 이 구속 조건은 식(2.6) 및 식(2.7)과 같다.

$$\dot{x} \cos \phi + \dot{y} \sin \phi + b \dot{\phi} = r \dot{\theta}_r \quad (2.6)$$

$$\dot{x} \cos \phi + \dot{y} \sin \phi - b \dot{\phi} = r \dot{\theta}_l \quad (2.7)$$

식(2.5) ~ (2.7)과 같은 구속조건은 바퀴로 주행하는 이동로봇의 nonholonomic 구속조건이다. 이러한 구속조건은 구속방정식들을 적분할 수 없다는 특징이 있다. 또한 구속방정식 좌표를 간소화할 수 없기 때문에 기구학적, 동력학적 그리고 시스템 모델링해석에 많은 어려움이 따른다.

2.2.3 구속 방정식 유도

이동로봇의 구속 방정식을 유도하기 위해 이동로봇의 자세를 고려한 일반화 좌표 q 를 식(2.8)과 같이 정의하고 식(2.9)를 만족하는 $A(q)$ 를 구속방정식 식(2.5) ~ (2.7)을 이용하여 식(2.10)과 같이 나타낸다.

$$q = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \phi \\ \theta_r \\ \theta_l \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$A(q)\dot{q} = 0 \quad (2.9)$$

여기서,

$$A(q) = \begin{bmatrix} \sin \phi & -\cos \phi & d & 0 & 0 \\ \cos \phi & \sin \phi & b & -r & 0 \\ \cos \phi & \sin \phi & -b & 0 & -r \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

식(2.10)의 $A(q)$ 를 이용하여 식(2.12)를 만족하는 $S(q)$ 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} S(q) &= [s_1(q), s_2(q)] \\ &= \begin{bmatrix} c(b \cos \phi - d \sin \phi) & c(b \cos \phi + d \sin \phi) \\ c(b \sin \phi + d \cos \phi) & c(b \sin \phi - d \cos \phi) \\ c & -c \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$A(q)S(q) = 0 \quad (2.12)$$

여기서,

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

단, $S(q)$ 는 식 (2.12)를 만족시킬 수 있는 벡터들로 구성된 full-rank 행렬이다. 구속방정식 식(2.9)와 식(2.12)에 의하면 \dot{q} 와 $S(q)$ 는 $A(q)$ 의 null space이므로 \dot{q} 는 $s_1(q)$, $s_2(q)$ 의 선형 결합 형태로

나타낼 수 있다. 따라서 식(2.13)과 같이 표현되어질 수 있다.

$$\dot{q} = s_1(q)\psi_1 + s_2(q)\psi_2 = S(q)\psi \quad (2.13)$$

$$\ddot{q} = S(q)\dot{\psi} + \dot{S}(q)\psi \quad (2.14)$$

$$\phi = [\phi_1 \phi_2]^T = \theta = [\theta_r \theta_l]^T = [\dot{w}_r \dot{w}_l]^T \quad (2.15)$$

식(2.11)과 식(2.13)을 이용하여 \dot{q} 를 식(2.16)과 같이 정의할 수 있고,

$$\begin{aligned} \dot{q} &= \begin{bmatrix} c(b \cos \phi - d \sin \phi) & c(b \cos \phi + d \sin \phi) \\ c(b \sin \phi + d \cos \phi) & c(b \sin \phi - d \cos \phi) \\ c & -c \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_r \\ \dot{\theta}_l \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\theta}_r \\ \dot{\theta}_l \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.16)$$

식(2.16)의 상태 변수중 $\dot{\theta}_r$ 과 $\dot{\theta}_l$ 을 제외한 \dot{x} , \dot{y} , $\dot{\phi}$ 를 식(2.4)에 대입하여 V , Φ 와 $\dot{\theta}_r$, $\dot{\theta}_l$ 의 관계를 나타내면 식(2.17)과 같이 표현되어진다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -d \sin \phi \\ \sin \phi & d \cos \phi \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ \Phi \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

2.3 용접 이동로봇의 동력학적 운동방정식

이동로봇은 상하 굴곡이 없는 2차원 평면상에서 운동하므로 위치 에너지 E_P 는 0이고, 로봇이 주행하는 바닥과의 마찰 에너지는 로봇이 그 마찰력을 극복하고 주행할 수 있으므로, 주행 운동에서 고려하지 않는다. 따라서 마찰 에너지 E_F 도 역시 0이라고 가정할 수 있다. 그러므로 전체 에너지 E_T 는 다음과 같다.

$$E_T = \frac{1}{2} m (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + \frac{1}{2} I \dot{\phi}^2 + \frac{1}{2} I_w (\dot{\theta}_r^2 + \dot{\theta}_l^2) + m_w d \dot{\phi} (\dot{x} \sin \phi - \dot{y} \cos \phi) \quad (2.18)$$

여기서,

$$m = m_c + 2m_w$$

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

이동로봇의 운동방정식을 구하기 위해 식(2.18)을 라그랑제 방정식 (Lagrange's equation)에 적용하면 식(2.19)와 같이 나타내어진다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial E_T}{\partial q_i} = \tau_i - \sum_{j=1}^3 A_{ij}^T \lambda_j, \quad i = 1, \dots, 5 \quad (2.19)$$

$$m\ddot{x} + m_w d (\ddot{\phi} \sin \phi + \dot{\phi}^2 \cos \phi) = \lambda_1 \sin \phi + (\lambda_2 + \lambda_3) \cos \phi \quad (2.20)$$

$$m\ddot{y} - m_w d (\ddot{\phi} \cos \phi - \dot{\phi}^2 \sin \phi) = \lambda_1 \cos \phi + (\lambda_2 + \lambda_3) \sin \phi \quad (2.21)$$

$$m_w d(\ddot{x} \sin \phi - \ddot{y} \cos \phi) + I \ddot{\phi} = d\lambda_1 - b(\lambda_3 - \lambda_2) \quad (2.22)$$

$$I_w \ddot{\theta}_r = \tau_r - \lambda_2 r_w \quad (2.23)$$

$$I_w \ddot{\theta}_l = \tau_l - \lambda_3 r_w \quad (2.24)$$

여기서 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 는 3개의 독립적인 동역학적 구속 조건에 상응하는 라그랑제 멀티플라이(Lagrange multipliers)이고, τ_r, τ_l 은 좌우 구동 바퀴에 작용하는 회전 토크이다.

식(2.10)과 식(2.19)를 오일러-라그랑제(Euler-Lagrange) 공식을 이용하여 재정리하면 식(2.25)와 같이 간단하게 표현되어질 수 있다.

$$M(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} = E(q) \tau_p - A^T(q) \lambda \quad (2.25)$$

여기서,

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

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

단 $M(q)$ 는 관성행렬, $C(q, \dot{q}) \dot{q}$ 는 구심력과 코리올리스력(coriolis

force) 항이며 $E(q)$ 는 full-rank 입력 변형행렬이다. $A(q)$ 는 자코비안 행렬(Jacobian matrix)이며 τ_p , λ 는 각각 제어입력 벡터와 구속력의 벡터이다. 식(2.25)를 간소화하기 위해 라그랑제 멀티플라이 λ 를 소거한다. λ 를 소거하기 위해서는 식(2.25)의 양변에 $S^T(q)$ 를 곱하여 계산하면 식(2.26)과 같다.

$$\begin{aligned} S^T(q)M(q)\ddot{q} + S^T(q)C(q, \dot{q})\dot{q} \\ = S^T(q)E(q)\tau_p - S^T(q)A^T(q)\lambda \end{aligned} \quad (2.26)$$

식(2.26)에서 $S^T(q)A^T(q)\lambda = 0$, $S^T(q)E(q)\tau_p = I_{2 \times 2}$ 의 관계를 이용하고 식(2.14)를 식(2.26)에 대입하면 식(2.27)과 같이 간단하게 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} S^T(q)M(q)\{S(q)\dot{\psi} + \mathfrak{S}(q)\psi\} \\ + S^T(q)C(q, \dot{q})S(q)\psi = \tau_p \end{aligned} \quad (2.27)$$

상태변수를 $\mathbf{x} = [x, y, \phi, \theta_r, \theta_l, \dot{\theta}_r, \dot{\theta}_l]^T = [q, \psi]^T$ 로 정의하면, 이동로봇의 상태방정식은 식(2.13)과 식(2.27)에 의해서 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} = & \begin{bmatrix} S\psi \\ -(S^TMS)^{-1}(S^TMS\dot{\psi} + S^TCS\psi) \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} 0 \\ (S^TMS)^{-1} \end{bmatrix} \tau_p \end{aligned} \quad (2.28)$$

2.4 격자형 용접선 추적 센서를 이용한 용접 이동로봇의 운동 해석

Fig. 2.2는 $(n - 1)$ 번째에서 (n) 번째로 이동로봇이 주행할 때 로봇 중심의 전진 방향 속도와 용접속도의 관계를 나타며, 또한 용접선을 추적하기 위해 토치 슬라이더가 전진 방향으로 진행한 길이와 용접속도의 관계를 나타낸 것이다.

격자의 직선부를 용접하기 위해 이동로봇은 용접속도와 동일한 속도로 주행한다. 이 때 좌우 구동바퀴의 전진 속도 역시 용접속도와 동일하며, 이동로봇은 회전 각속도 없이, 오직 전진 속도만을 가진다. 하지만, 이동로봇이 주행하는 동안 바닥에 이물질이 있거나, 요철이 있을 경우 또는 기타, 다른 외란으로 인해 좌우 구동바퀴의 회전 속도에 차가 발생하게 되면 이동로봇은 시계 방향 또는 시계 반대방향으로 회전하면서 주행한다. 이럴 경우 용접선과 이동로봇 사이의 거리차가 발생하게 되는데 이 거리차를 용접선 추적 센서가 감지하고, 용접 토치가 부착된 토치 슬라이더를 전진 방향 또는 후진 방향으로 길이 제어를 행하며 용접선을 추적한다. 이 때 이동로봇의 회전 각속도 성분에 의해 용접속도의 변화가 야기된다. 이동로봇의 자세에 관계없이 용접속도는 항상 일정하게 제어되어야 하므로 이동로봇이 좌우로 요동할 때의 용접속도 해석은 아주 중요한 문제이다.

x_0 는 $(n - 1)$ 번째의 용접 토치 슬라이더의 길이이고, x_s 는 (n) 번째에서 격자형 용접선 추적 센서의 길이이며 x_t 는 용접토치가 부착된 토치 슬라이더의 길이이다.

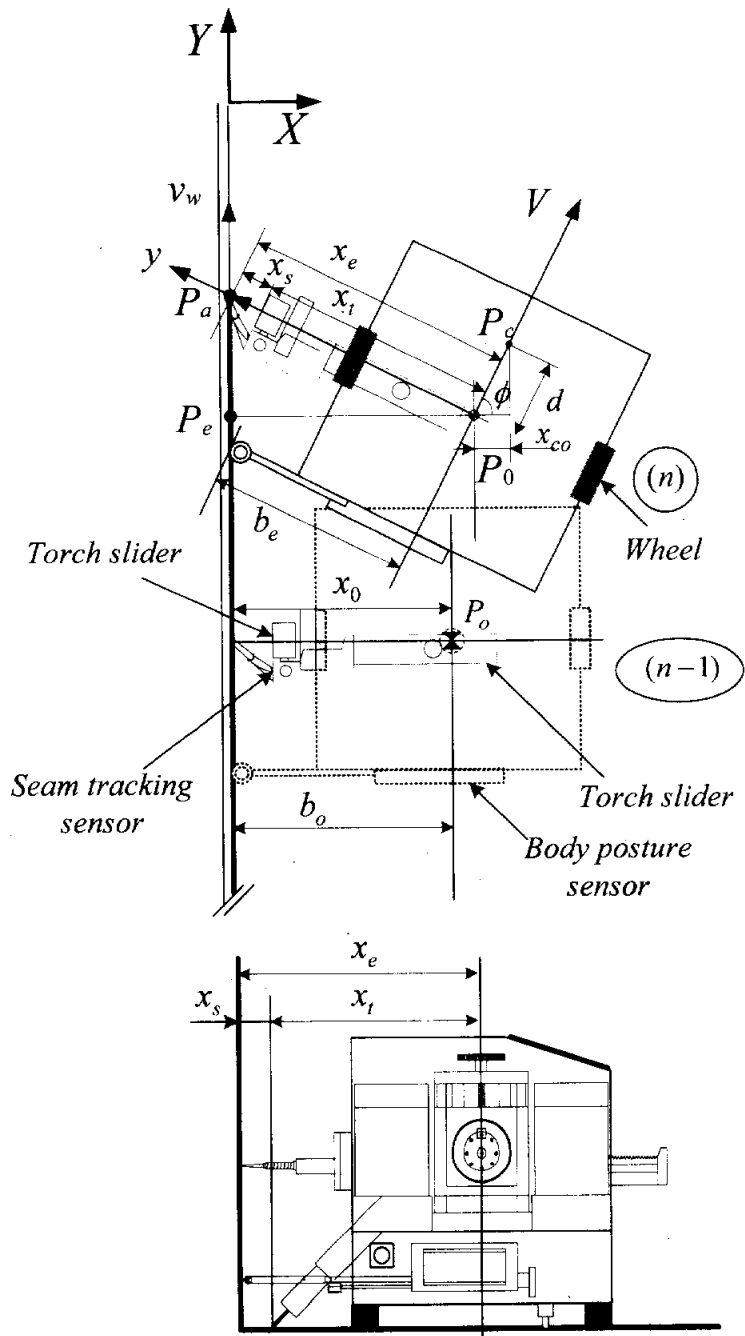


Fig. 2.2 Torch length and mobile robot velocity for lattice welding

용접 초기점에서 용접 토치 끝단, 즉 용접점은 격자형 용접선 추적 센서의 끝점 x_s 의 끝점과 일치한다. 하지만, 이동로봇이 주행중 용접선과 멀어지게 되면 용접선 추적 센서 내부의 스프링에 의해 용접선 추적 센서는 필릿의 상판 벽면 쪽으로 길어지게 되고, x_s 의 길이는 초기값보다 신장되어 거리오차가 발생한다. 이 때 용접 토치 슬라이더는 용접선을 추적하기 위해 용접점 방향으로 x_s 의 변위만큼 토치 슬라이더의 길이 제어를 행하므로 용접선을 추적하게 된다. 토치 슬라이더의 길이 x_t 는 x_s 의 변위만큼 전후로 움직이며 x_s 의 변위를 항상 0이 되도록 제어한다.

$(n - 1)$ 번째에서 (n) 번째로 주행할 때 이동로봇이 필릿의 벽면과 거리차가 발생하지 않았다면 실제 용접이 이루어져할 점은 P_e 이다. 하지만, $(90 - \phi)$ 만큼의 진행각 오차로 인해 실제 용접이 진행되고 있는 지점은 P_a 이다. 이것을 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\overline{P_a P_e} = x_e \sin(90 - \phi) \quad (2.29)$$

식 (2.29)을 미분하면 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \overline{P_a P_e} = \dot{x}_e \cos \phi - x_e \dot{\phi} \sin \phi \quad (2.30)$$

여기서,

$$x_e = x_s + x_t = \frac{x - x_{co}}{\cos(90 - \phi)} = \frac{x}{\sin \phi}$$

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

식 (2.30)과 이동로봇 중심에서의 전진 방향 속도 V 를 이용하여 이동로봇이 요동할 때 실제 용접이 이루어지는 지점의 용접 속도 v_w 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} v_w &= \frac{d}{dt} \overline{P_a P_e} + V \sin \phi \\ &= \dot{x}_e \cos \phi - x_e \dot{\phi} \sin \phi + V \sin \phi \end{aligned} \quad (2.31)$$

2.5 자유곡선형 용접선 추적 센서를 이용한 용접 이동로봇의 운동 해석

2.5.1 자유곡선형 용접선 추적 센서

Fig. 2.3은 자유곡선형 용접선을 추적하기 위해 용접선의 정보를 획득하는 방법을 나타낸 것이다. 표현상 로봇 본체는 작게 표현되었고, 센서는 실제 크기보다 크게 표현되었다. 본 연구에서 적용한 자유곡선형 용접선 추적 센서는 부경대학교 CIMEC 연구실의 Tien, Hieu와 Lam이 개발한 것이다^[4].

자유곡선형 용접용 이동로봇은 사전에 용접선 경로에 대한 정보가 없는 상태이므로 용접 진행중 용접선에 대한 정보를 획득하는 것이 중요한 과제이다. 자유곡선형 용접선 추적 센서는 2개의 포텐서미터(linear potentiometer)를 내장하고 있다.

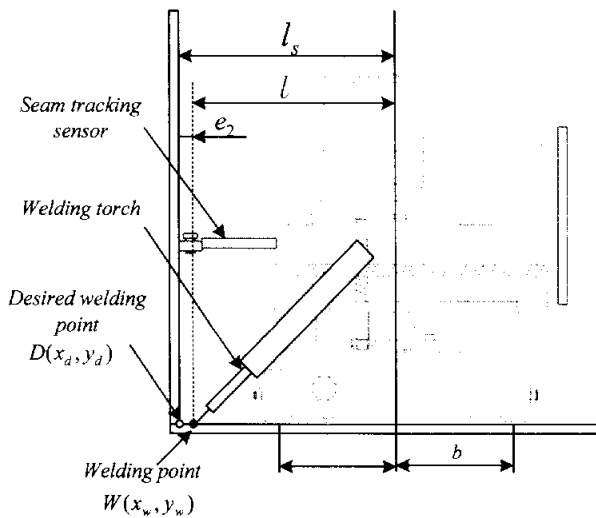
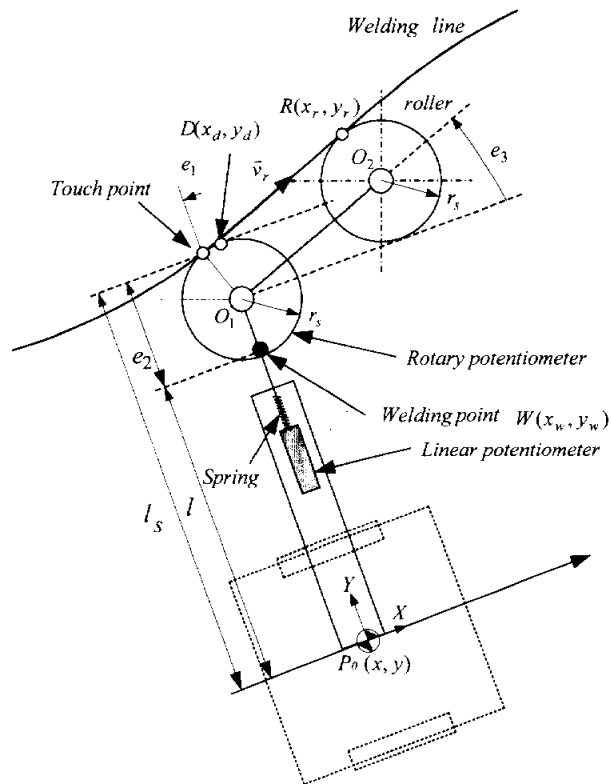


Fig. 2.3 Acquirement of the smooth curve welding line information

O_1 롤러 내부에 회전형 포텐서미터가 내장되어져 있는데 이것은 다음 목표 용접점 R 에 위치한 O_2 롤러와 이루는 각도를 측정하며 이 값을 e_3 라 한다. 즉, 현재 용접점과 다음 목표 용접점의 각도를 측정하는 것이다. 이동로봇의 진행각도와 평행하게 O_1 과 O_2 가 위치한다면 용접선과 이동로봇은 평행한 상태이고, e_3 는 0이 된다. 그리고 현재 용접점과 다음 목표 용접점 사이에 각도 오차가 발생하면 O_1 롤러와 O_2 롤러 사이에 e_3 가 발생한다. O_1 롤러와 O_2 롤러 사이에 스프링이 설치되어져 있기 때문에 항상 O_2 롤러가 필릿의 상판 벽면에 접촉된 상태로 이동로봇은 주행하며 또한 O_1 롤러와 토치 슬라이더 사이에 스프링이 있어 O_1 롤러 역시 항상 필릿의 상판 벽면에 접촉된 상태를 유지한다.

용접 토치가 부착된 토치 슬라이더의 길이가 고정되어져 있기 때문에 용접선에서 이동로봇이 멀어지게 되면 O_1 롤러는 스프링의 힘으로 필릿의 벽면으로 진행하지만, 용접토치는 용접점까지 진행하지 못하는 상태가 된다. Fig. 2.3에서 보는 것과 같이 현재 용접이 이루어지고 있는 지점은 W 점이고 실제 용접이 이루어져야할 지점은 D 점이다. 이와 같이 이동로봇의 위치 오차로 인해 용접점의 오차가 발생하는데 이 오차값은 토치 슬라이더에 설치된 선형 포텐서미터로 측정하며, 이 오차값을 e_2 로 정의한다. 즉 e_2 는 이동로봇의 중심에서 용접점까지의 거리 오차이다.

필릿 용접에서 용접 토치가 용접 진행 방향과 이루는 각도(토치 진행각)는 90° 를 표준으로 하며 통상 중/저 진류 영역에서 $\pm 10^\circ$ 범위까지

허용한다. Fig. 2.3에서 W 와 D 가 일치하더라도 진행각의 오차가 발생하게 되고, 이 때 진행각이 90° 인 접촉점과 실제 용접이 이루어지고 있는 D 지점까지는 e_1 만큼의 거리 오차가 발생한다.

e_1 , e_2 와 e_3 은 식(2.32) ~ 식(2.34)과 같다.

$$e_1 = r_s \sin e_3 \quad (2.32)$$

$$e_2 = l_s - l \quad (2.33)$$

$$e_3 = \angle (O_1 C, O_1 O_2) \quad (2.34)$$

2.5.2 오차 방정식을 이용한 자유 곡선형 용접 이동로봇의

운동 방정식

Fig. 2.4는 자유 곡선형 용접 이동로봇이 좌표 상에서 운동하는 것을 나타낸 것이다. W 는 현재 용접이 이루어지고 있는 좌표 (x_w, y_w, ϕ_w) 를 나타내며, R 은 목표 용접경로의 목표점 (x_r, y_r, ϕ_r) 을 나타낸다. D 와 W 가 일치할 때 목표 용접점과 이동로봇의 기구학적 운동방정식 사이의 관계를 식(2.17)을 이용하여 표현하면 식(2.35)와 같다.

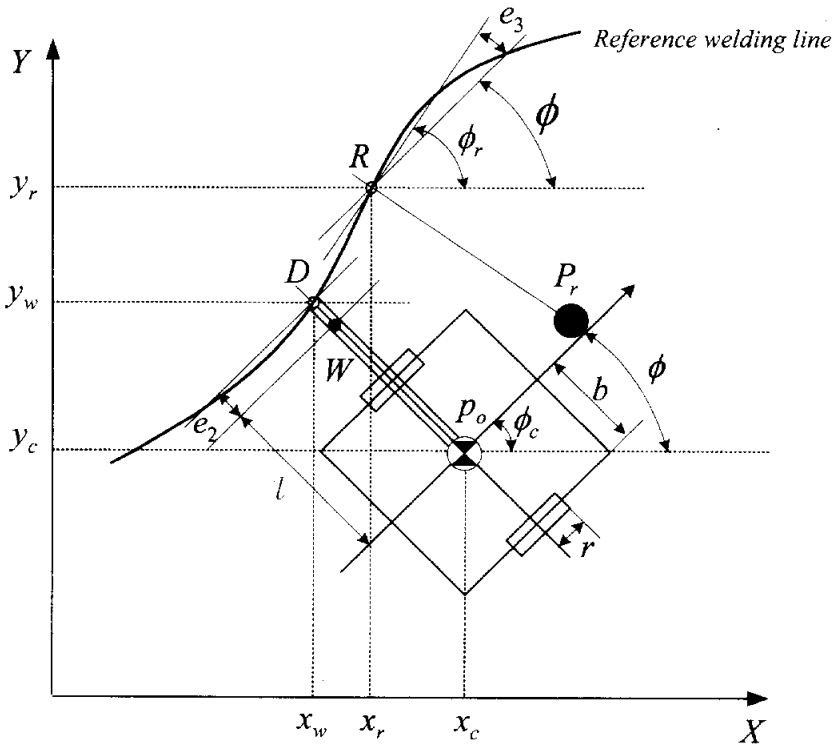


Fig. 2.4 Coordinates of the two wheeled mobile robot for smooth curved welding

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{y}_r \\ \dot{\phi}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi_r & -d \sin \phi_r \\ \sin \phi_r & d \cos \phi_r \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ \phi_r \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

여기서 V_r 은 목표 용접속도이며, 이 용접속도는 항상 일정하게 제어되어야 한다. ϕ_r 은 목표 용접선과 X 축이 이루는 각도이다. Fig. 2.4에서 보는 바와 같이 현재 용접점 W 지점과 이동로봇의 중심과의 관계는 다음식과 같다.

$$\begin{aligned} x_w &= x - l \sin \phi \\ y_w &= y + l \cos \phi \\ \phi_w &= \phi \end{aligned} \quad (2.36)$$

또한, 용접점 W 와 이동로봇의 운동 방정식과의 관계는 다음식과 같다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_w \\ \dot{y}_w \\ \dot{\phi}_w \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos \phi & -l \cos \phi - d \sin \phi \\ \sin \phi & -l \sin \phi + d \cos \phi \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ \phi \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} -l \sin \phi \\ l \cos \phi \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.37)$$

자유 곡선형 용접 이동로봇은 용접선을 추적하기 위해 용접선 추적 오차 $e = [e_1 \ e_2 \ e_3]^T$ 가 항상 0으로 수렴하도록 제어한다. 하지만, 자

유 곡선형 용접선의 특성상 e_3 는 항상 존재하게 되고, 이 때 발생하는 오차 e_3 에 의해 다음 목표 용접선의 정보를 획득한다. 식(2.38)은 용접선 추적 오차 $e = [e_1 \ e_2 \ e_3]^T$ 와 현재 용접점 및 목표 용접점 사이의 관계를 나타낸다. 식(2.39)는 식(2.38)을 미분한 것이다.

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x_w \\ y_r - y_w \\ \phi_r - \phi_w \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \\ \dot{e}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_r \cos e_3 - w_r d \sin e_3 \\ v_r \sin e_3 - l + w_r d \cos e_3 \\ w_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 & e_2 + l \\ 0 & -e_1 - d \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ \Phi \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

식 (2.39)를 간소화하기 위해 $\dot{e} = \zeta$ 로 정의하면 식(2.40)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\zeta = f(\zeta) + g(\zeta)\eta \quad (2.40)$$

여기서,

$$\zeta = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix}, \quad f(\zeta) = \begin{bmatrix} v_r \cos e_3 - w_r d \sin e_3 \\ v_r \sin e_3 - l + w_r d \cos e_3 \\ w_r \end{bmatrix},$$

$$g(\zeta) = \begin{bmatrix} -1 & e_2 + l \\ 0 & -e_1 - d \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad \eta = \begin{bmatrix} V \\ \Phi \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

식(2.40)을 이동로봇의 동력학적 운동방정식 식(2.27)과 결합하여 재 정리하면 식(2.42)와 같다.

$$\overline{M}(q)\ddot{\theta} + \overline{C}(q, \dot{q})\dot{\theta} = \tau_p \quad (2.42)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \overline{M} &= S^T M S \\ &= \begin{bmatrix} c^2\{m(b^2 + d^2) - 2dm_e + I\} + I_w & c^2\{m(b^2 - d^2) + 2dm_e - I\} \\ c^2\{m(b^2 - d^2) + 2dm_e - I\} & c^2\{m(b^2 + d^2) - 2dm_e + I\} + I_w \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \overline{C} &= S^T (MS + CS) \\ &= \begin{bmatrix} 0 & -2bc^2\Phi(m_e - m_d) \\ 2bc^2\Phi(m_e - m_d) & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$m_e = m_c d, \quad m = m_c + 2m_w,$$

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

m_c 는 구동바퀴와 DC모터를 제외한 이동로봇의 질량이며, m_w 는 모터의 로터를 포함한 구동바퀴의 질량이다. I_c 는 구동바퀴를 제외한 이동

로봇의 관성모멘트이고, I_w 는 모터의 로터를 포함한 구동바퀴의 관성모멘트, I_m 은 모터축의 관성모멘트이다.

좌우 구동바퀴의 속도에 따른 이동로봇의 속도를 나타내는 식(2.4)와 식(2.42)을 결합하면 식(2.43)과 같다.

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \frac{r}{2}m + \frac{1}{r}I_w & \frac{r}{2b}(I + md^2 - 2m_e d) + \frac{b}{r}I_w \\ \frac{r}{2}m + \frac{1}{r}I_w & -\frac{r}{2b}(I + md^2 - 2m_e d) - \frac{b}{r}I_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ \Phi \end{bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} -\frac{r}{2b}(m_e - m_d)\Phi & -\frac{r}{2}(m_e - m_d)\Phi \\ -\frac{r}{2b}(m_e - m_d)\Phi & -\frac{r}{2}(m_e - m_d)\Phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ \Phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_r \\ \tau_l \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.43)$$

식(2.43)를 간소화하기 위해 양변에 $\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$ 를 곱하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} rm + \frac{2}{r}I_w & 0 \\ 0 & \frac{r}{b}(md^2 + I - 2m_e d) + \frac{2b}{r}I_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ \Phi \end{bmatrix} \\ & = \frac{r}{b}(m_e - m_d) \begin{bmatrix} 0 & b\Phi \\ -\Phi & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ \Phi \end{bmatrix} \\ & \quad + \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_r \\ \tau_l \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.44)$$

또한, 식(2.44)를 식(2.45)와 같이 간단한 형태로 다시 정리한다.

$$\Delta_1 \dot{\eta} = \Delta_2 h(\eta) + k(\eta) u \quad (2.45)$$

여기서

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= \begin{bmatrix} \theta_{11} & 0 \\ 0 & \theta_{12} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} rm + \frac{2}{r} I_\omega & 0 \\ 0 & \frac{r}{b} (md^2 + I - 2m_e d) + \frac{2b}{r} I_\omega \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.46)$$

$$\Delta_2 = \theta_2 = \frac{r}{b} (m_e - md) = \frac{r}{b} (m_e d - md) \quad (2.47)$$

$$h(\eta) = \begin{bmatrix} 0 & b\Phi \\ -\Phi & 0 \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

$$k(\eta) = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

$$u = \begin{bmatrix} \tau_r \\ \tau_l \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

제 3 장

격자형 용접 이동로봇의 개발 및 제어

3.1 서언

본 장은 격자형(lattice type) 용접을 위한 용접 이동로봇의 개발 내용 및 제어 알고리즘과 격자형 용접선을 추적할 수 있는 용접선 추적 센서의 개발 내용을 나타낸다. 격자형 용접이란 용접선이 90°인 용접선 형태를 가진 용접 공정을 의미하는데 이러한 격자형 용접형태는 조선 공정이나 대형 철구조물에 널리 적용되는 용접 형태이다.

Fig. 3.1은 박스형 타입의 격자형 모재 형상을 나타낸 것이고, Fig. 3.2는 에그 박스 타입의 격자형 모재 형상을 나타낸 것이다.

유조선 등 대형 선박의 선저는 선체의 강도를 향상시키기 위해 에그 박스(egg box) 구조로 되어져 있고, 또한 사고로 인해 선체가 파손될 경우 해상 오염을 방지하기 위해 선저는 이중구조로 되어져 있다. Fig. 3.3은 이러한 선체의 구조를 나타낸 것이다. 이와 같은 에그 박스 구조나 이중구조는 많은 격자형 모재 형상을 가지게 된다^[22].

현재 이러한 격자형 용접 공정에서는 오토 캐리지(auto carriage)를 이용하여 격자의 직선부를 자동 용접하거나, 갠트리 로봇(gantry robot)을 이용하여 격자의 직선부를 자동 용접하고 있지만, 현재 격자의 모서리부는 작업자의 수작업에 의존하고 있는 실정이다^[23]. 따라서 격자형 용접은 생산비용이 높고, 용접 품질 안정화에 많은 문제점이 있다. 최근 이러한 비효율적인 작업을 보완하기 위해서 격자의 모서리부까지 자동으로 용접할 수 있는 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^[24].

Photo 3.1은 오토 캐리지를 이용하여 격자의 직선부를 용접하는 장면이고, Photo 3.2는 갠트리 로봇을 이용하여 용접하는 장면이다.

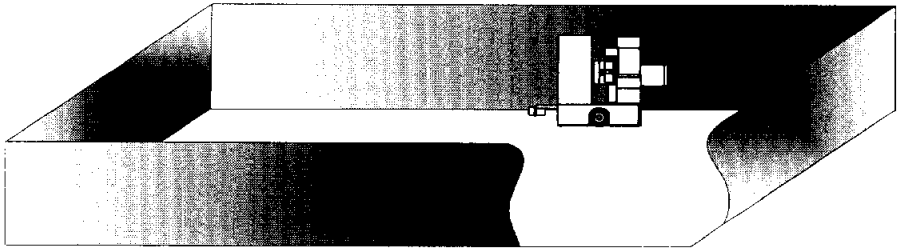


Fig. 3.1 A box type of lattice welding line

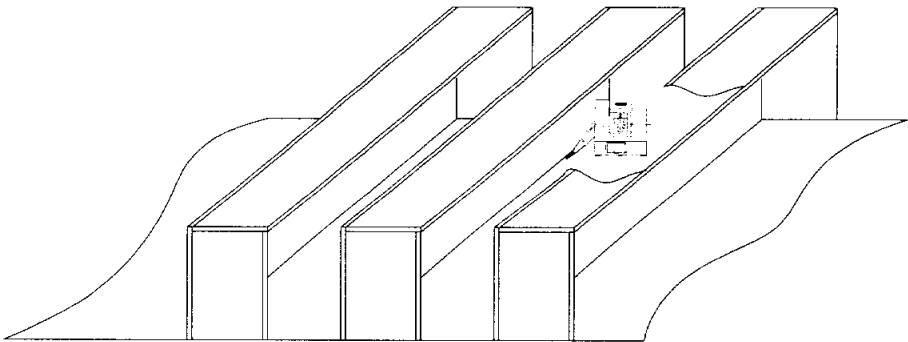


Fig. 3.2 A egg box type of lattice welding line

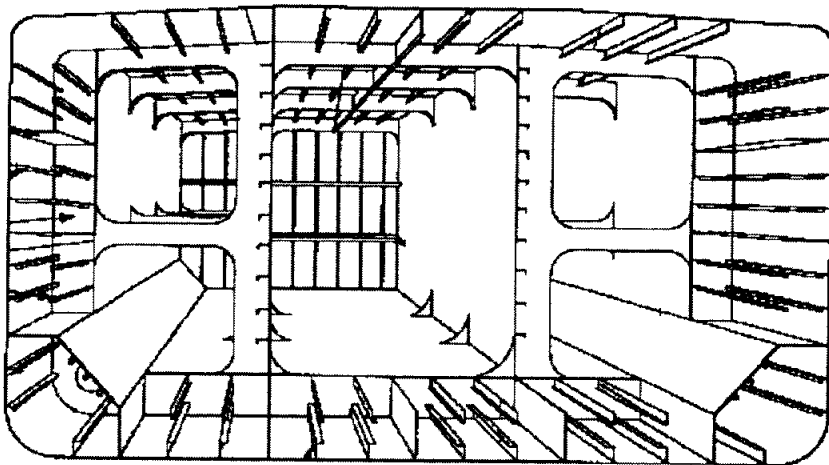


Fig. 3.3 Structure of the bottom of a ship

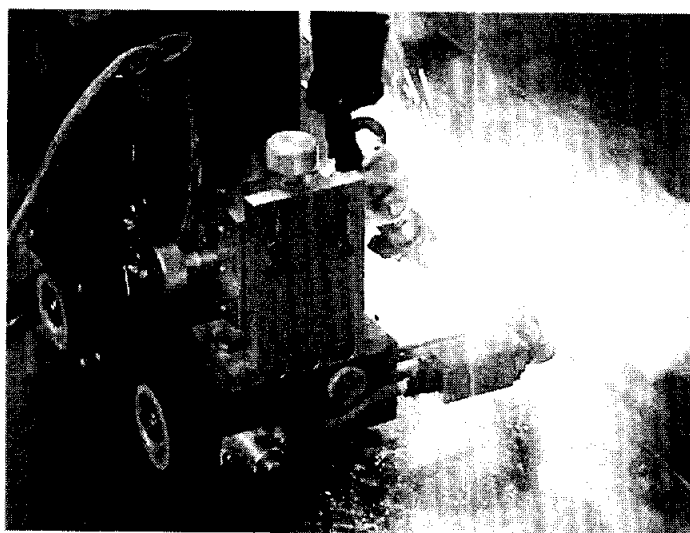


Photo. 3.1 Straight welding by auto carriage

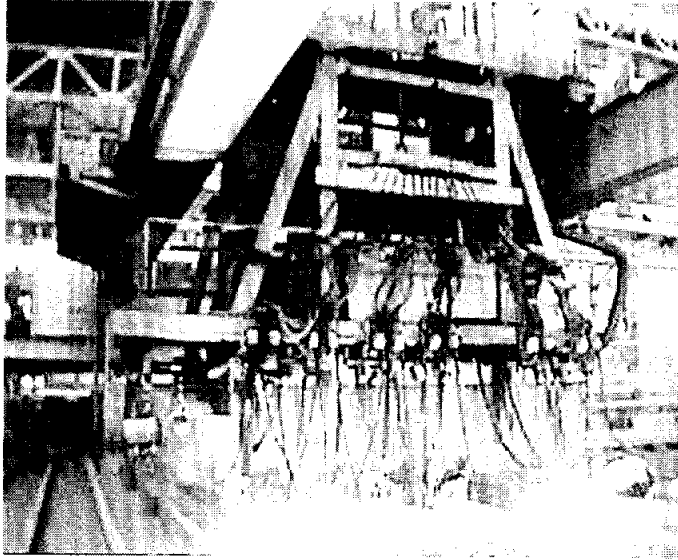


Photo. 3.2 Straight welding by a gantry robot

갠트리 로봇(gantry robot)은 입력된 용접선 정보에 따라 용접을 행하거나, 교시에 의해 용접을 행하는데, 격자형 용접 자동화에 있어서, 갠트리 로봇의 적용은 여러 가지 문제점이 있다. 우선, 조선 및 대형 플랜트에 적용할 때 용접 공정의 초기 시작점을 찾기 위해서는 상당한 시간이 소요되며, 모재의 치수오차가 발생할 경우에는 매우 치명적인 오류를 범할 수 있다²⁵⁾. 그리고 갠트리 로봇을 사용하기 위해서는 작업공간이 넓어야 하며, 또한 설비비가 고가이다. 따라서 갠트리 로봇은 조선 공정이나, 대형 철구조물 조립 공정에서 장소가 매우 협소한 격자형 용접에는 부적합하다. 따라서 격자형 용접의 직선부와 모서리부를 연속적으로 자동 용접하기 위해서는 보재 공간을 자유롭게 주행하면서 용접을 할 수 있는 이동로봇이 절실히 요구된다.

3.2 격자형 용접 이동로봇 제어 알고리즘

3.2.1 용접선 추적 제어 알고리즘

격자형 용접의 직선부와 모서리부를 연속적으로 용접하기 위해서는 용접선 추적 제어가 필수적이다. 전절의 Fig. 2.2에서 나타낸 것과 같이 용접 초기점에서 용접 토치 끝단, 즉 용접점은 격자형 용접선 추적 센서의 끝점 x_s 의 끝점과 일치한다. 하지만, 이동로봇이 주행중 용접선과 멀어지게 되면 용접선 추적 센서 내부의 스프링에 의해 용접선 추적 센서는 필릿의 상판 벽면 쪽으로 길어지게 되고, x_s 의 길이는 초기값보다 신장되고 이 때 용접 토치 슬라이더는 용접선을 추적하기 위해 용접점 방향으로 x_s 의 변위만큼 전진하여 용접선을 추적한다. 토치 슬라이더의 길이 x_t 는 x_s 의 변위만큼 전후로 움직이며 x_s 의 변위를 항상 0이 되도록 제어한다.

이 절에서는 용접선 추적을 위한 토치 슬라이더의 제어 입력에 대해서술한다. 뉴턴 제 2법칙에 의해서 토치 슬라이더 구동 모터의 로터는 식(3.1)과 같이 표현할 수 있다.

$$J_t \frac{d^2 \theta_t}{dt^2} + D_t \frac{d \theta_t}{dt} = \tau_t \quad (3.1)$$

식(3.1)을 토치 슬라이더 길이와의 관계로 표현하기 위해, 양변에 피리언(pinion)의 반경 r_p 을 곱한다. 또한 토치 슬라이드 길이 x_t 가 $r_p \theta_t$ 인 관계를 이용하여 식(3.1)을 식(3.2)와 같이 나타낸다.

$$\ddot{x}_t = -A \dot{x}_t + B \tau_t \quad (3.2)$$

여기서

$$A = \frac{D_t}{J_t}, \quad B = \frac{r_p}{J_t}$$

용접선 추적을 위한 토치 슬라이더 길이 x_t 는 x_s 의 변위에 따라 제어되는데 제어기는 PID 제어를 이용한다. 오차 e_s 는 용접선 추적 센서의 변위를 나타낸다. x_s^d 는 초기의 용접선 추적 센서의 길이이고, x_s 는 용접점이 용접선을 이탈할 때의 용접선 추적 센서의 길이이다. u_s 는 토치 슬라이더의 길이를 제어하기 위한 DC 모터의 제어입력이며, 출력 y_s 는 용접선 추적 센서의 길이이다.

$$e_s = x_s^d - x_s \quad (3.3)$$

$$u_s = K_{PS}e_s + K_{IS} \int e_s dt + K_{DS} \dot{e}_s = \tau_t \quad (3.4)$$

$$y_s = x_s \quad (3.5)$$

3.2.2 이동로봇의 직선 주행 제어 알고리즘

격자형 용접 이동로봇은 두개의 구동 모터를 가지며, 이들 모터는 개별적으로 속도 제어된다. 격자형 용접 이동로봇이 격자의 직선부를 용접하기 위해서는 로봇 본체의 회전 각속도 없이 오직 전진 방향의 직선 속도만 존재하도록 제어하여야 한다. 하지만, 이동로봇이 주행하는 동안 바닥에 이물질이 있거나, 요철이 있을 경우 또는 기타, 다른 외란으로 인해 좌우 구동바퀴의 회전 속도에 차가 발생하게 되며 이때 이동로봇은 시계 방향 또는 시계 반대방향으로 회전하면서 주행한다. 이런 경우 용접선과 이동로봇 사이의 거리차가 발생하게 되는데 이 거리차를 용접선 추적 센서가 감지하고, 용접 토치가 부착된 토치 슬라이더를 전진 방향 또는 후진 방향으로 길이 제어를 행하며 용접선을 추적한다. 이때 이동로봇의 회전 각속도 성분에 의해 용접속도의 변화가 야기된다.

용접 이동로봇이 격자의 직선부 용접선을 추적하기 위해서 좌우측 양쪽 모터의 속도를 개별적으로 제어한 결과 지나친 응답성으로 인해 이동로봇 본체가 심하게 요동한다는 결과를 얻었다. 따라서 직선부 용접선을 추적할 때 용접선의 추적은 용접선 추적 센서와 토치 슬라이더가 담당하며, 이동로봇의 좌측 구동바퀴 속도는 용접속도와 동일하게 제어하고, 우측 바퀴 구동 모터의 속도만을 제어하여 이동로봇이 직선적으로 주행할 수 있도록 제어한다. 따라서 직선 주행 제어시 우측 모터의 속도 제어만 행한다. 우측 모터의 속도 제어를 위해 PD 제어를 사용하였다.

우측 모터를 뉴턴의 제 2법칙으로 표현하면 식(3.6)과 같고, 우측 바퀴의 구동 모터 제어 입력은 u_p 이다.

$$J_r \frac{d^2 \theta_r}{dt^2} + D_r \frac{d\theta_r}{dt} = \tau_r \quad (3.6)$$

$$u_p = (K_{PP} e_p + K_{DP} \dot{e}_p) = \tau_r \quad (3.7)$$

$$\begin{bmatrix} v_r \\ v_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r & 0 \\ 0 & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_r \\ \theta_l \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$e_p = v_r^d - v_r \quad (3.9)$$

$$y_p = v_r \quad (3.10)$$

여기서, y_p 는 출력이고, e_p 는 우측 모터의 속도 오차이며, v_r^d 는 목표 속도 즉 용접 속도이다.

이동로봇의 자세 제어는 용접선 추적 센서의 정보와 로봇 자세 센서의 정보로 이루어진다. Table 3.1은 이 두 센서의 값에 따른 이동로봇의 자세를 크게 세 가지로 나타낸 것이고, Table 3.2는 로봇의 자세를 11가지로 세분화하여 나타낸 것이다. x_{ee} 는 초기의 용접선 추적 센서의 길이와 용접중인 현재의 용접선 추적 센서의 길이 차를 나타내고, b_{ee} 는 초기의 자세 센서 길이와 현재의 자세 센서 길이 차를 나타낸다. Table 3.1의 No. 1은 용접선 추적 센서의 길이와 자세 센서의 길이가 초기값과 일치하는 경우이며, 이 때는 이동로봇이 용접 벽면과 평행하게 주행하는 상태를 나타낸다. No. 2와 3의 경우는 센서의 길이 변화에 따라 이동로봇이 시계방향 또는 시계 반대 방향으로 요동하면서 주행하는 경우를 나타낸 것이다.

Table 3.1 Basic postures of a mobile robot

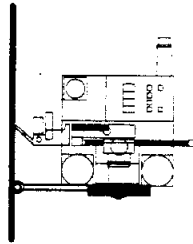
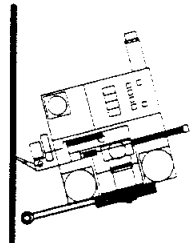
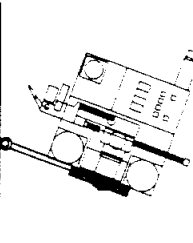
No	Body postures	Error values
1		$x_{ee} = 0, b_{ee} = 0$
2		$x_{ee} = 0, b_{ee} > 0$
3		$x_{ee} > 0, b_{ee} = 0$
<p>x_{ee}: the difference between the initial torch slider and current torch slider.</p> <p>b_{ee}: the difference between the initial body posture and current body posture.</p>		

Table 3.2 Posture patterns of a mobile robot

No	Error values $x_{ee} = x_e - x_0$, $b_{ee} = b_e - b_0$	Body postures CW : clock wise CCW : counter clock wise	Speed Control of right wheel
1	$x_{ee} = 0, b_{ee} = 0$	Desirous postures	.
2	$x_{ee} > 0, b_{ee} = 0$	CW direction	Up
3	$x_{ee} < 0, b_{ee} = 0$	CCW direction	Down
4	$x_{ee} = 0, b_{ee} < 0$	CCW direction	Down
5	$x_{ee} = 0, b_{ee} > 0$	CW direction	Up
6	$x_{ee} > 0, b_{ee} < 0$	CW direction	Up
7	$x_{ee} < 0, b_{ee} > 0$	CCW direction	Down
8	$x_{ee} > 0, b_{ee} > 0$ ($x_{ee} > b_{ee}$)	Go far from the welding line (CW direction)	Up
9	$x_{ee} > 0, b_{ee} > 0$ ($x_{ee} < b_{ee}$)	Go far from the welding line (CCW direction)	Up
10	$x_{ee} < 0, b_{ee} < 0$ ($x_{ee} > b_{ee}$)	Approach to welding line (CW direction)	Down
11	$x_{ee} < 0, b_{ee} < 0$ ($x_{ee} < b_{ee}$)	Approach to welding line (CCW direction)	Down

3.2.3 로봇의 선회 제어 알고리즘

Fig. 3.4는 격자형 용접 이동로봇이 격자의 모서리부를 감지하고 모서리부를 용접하기 위해 선회하는 동작을 나타낸다. (a)는 이동로봇이 격자의 직선부를 용접하다가 근접센서에 의해 격자의 모서리부를 감지하면 이동로봇은 제자리에서 선회 동작을 시작한다. 선회 지점은 이동로봇 전방에 부착된 근접센서로 감지되는데 이동로봇 중심에서 전방의 필릿 상판 모재까지의 거리는 이동로봇 중심에서 용접점까지의 거리 x_0 와 동일한 거리이다. 이동로봇은 선회하기 위해 우측 구동 모터를 용접 방향의 역방향으로 회전하고 좌측 구동 모터를 용접 방향으로 회전하게 된다. 이런 형태의 이동로봇의 장점 중 하나가 바로 이와 같이 제자리에서 회전 동작을 할 수 있다는 것이다. 근접센서의 감지 거리는 10mm이며, 비접촉 방식으로 이동로봇의 선회 지점을 감지한다.

(b)는 이동로봇이 45° 선회한 그림이다. (c)는 이동로봇이 격자의 모서리부 용접을 모두 마친 상태를 나타낸다. 격자의 모서리부 용접 완료 지점 확인은 선회를 시작할 때 제어장치가 기억해둔 용접선 추적 센서의 길이값과 자세 센서의 길이값을 이용하는데 이 값이 선회 시작 때의 값과 일치하면, 선회가 완료된 것으로 확인하고 다시 격자의 직선부 용접을 계속 진행한다.

격자의 모서리부 용접을 위해 이동로봇이 선회할 때의 용접속도 v_w 는 식(3.11)과 같다.

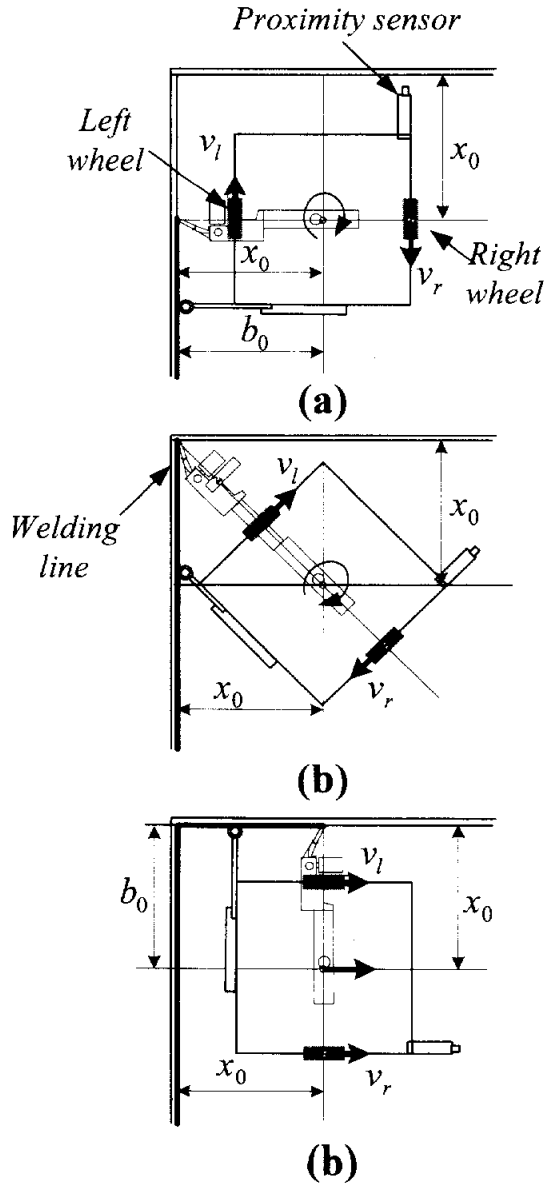


Fig. 3.4 Turing motion of a mobile robot for lattice welding

$$\begin{aligned}
 v_w &= \frac{d}{dt}(\overline{P_a P_e}) = \frac{d}{dt}(x_e \cos \phi) = \dot{x}_e \cos \phi - x_e \dot{\phi} \sin \phi \\
 &= \frac{d}{dt} \left\{ \frac{x}{\sin \phi} \right\} \cos \phi - x \dot{\phi}
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

이동로봇이 격자의 모서리부 용접을 위해 선회할 때 용접속도와 이동로봇의 회전 각속도와와의 관계를 나타내면 다음식과 같다.

$$\dot{\phi} = -\frac{\sin \phi^2 v_w}{x} = \dot{\phi}_r \tag{3.12}$$

격자의 모서리부를 용접하기 위해 이동로봇이 선회할 때 이동로봇의 목표 각속도 $\dot{\phi}_r$ 는 식(3.12)와 같다. 선회시 운동 방정식은 식 (3.13)과 같다.

$$J\ddot{\theta} + D\dot{\theta} = \tau \tag{3.13}$$

$$\theta = \begin{bmatrix} \theta_r \\ \theta_l \end{bmatrix}, \quad J = \begin{bmatrix} J_r & 0 \\ 0 & J_l \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} D_r & 0 \\ 0 & D_l \end{bmatrix}, \quad \tau_b = \begin{bmatrix} \tau_r \\ \tau_l \end{bmatrix} = u_a$$

좌우 구동바퀴의 회전 각속도에 따른 이동로봇의 선회 각속도는 다음과 같다.

$$\dot{\phi} = \frac{r}{2b}(\dot{\theta}_r - \dot{\theta}_l) \tag{3.14}$$

실제 모서리부 용접이 진행되고 있을 때 이동로봇의 회전 각속도 측정은 좌우 구동 모터에 부착된 엔코더의 신호를 입력 받아 식(3.14)으로 계산한다. 식(3.15)는 이동로봇이 선회할 때의 회전 각속도의 오차를 구하는 식이다.

$$e_a = -\frac{\sin \phi^2 v_w}{x} - \dot{\phi} = \dot{\phi}_r - \dot{\phi} \quad (3.15)$$

식(3.15)의 오차 e_a 를 이용해서 제어 입력 u_a 와 출력 y_a 는 다음과 같다.

$$u_a = (K_{PT}e_a + K_{DT}\dot{e}_a) \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

$$y_a = \dot{\phi} \quad (3.17)$$

3.3 격자형 용접 이동로봇의 설계

Fig. 3.5는 격자형 용접 이동로봇의 구성을 나타낸다. 실제 산업 현장에 적용할 수 있도록 제어 시스템 및 본체를 소형으로 설계 제작하였다. Photo. 3.3은 본 연구에서 개발된 격자형 용접 이동로봇을 나타낸다. 이동 로봇은 제어 장치, 구동 장치, 용접선 추적 장치로 구성된다. 제어장치는 Intel 80C196KC 마이크로프로세서를 기반으로 개발하였으며, 주제어부, 구동 제어부, 토치 슬라이더 제어부로 구성된다. 구동장치

는 2개의 구동 바퀴를 개별적으로 제어할 수 있도록 설계하였고, 모터는 DC 서브 모터(24V, 24W)를 이용하였다. 용접선 추적 센서는 내부에 선형 타입의 포텐서 미터를 내장하여 토치 슬라이더가 용접선에서 이탈하는 거리를 측정하고 발생하는 오차 정보에 의해 용접선을 추적한다.

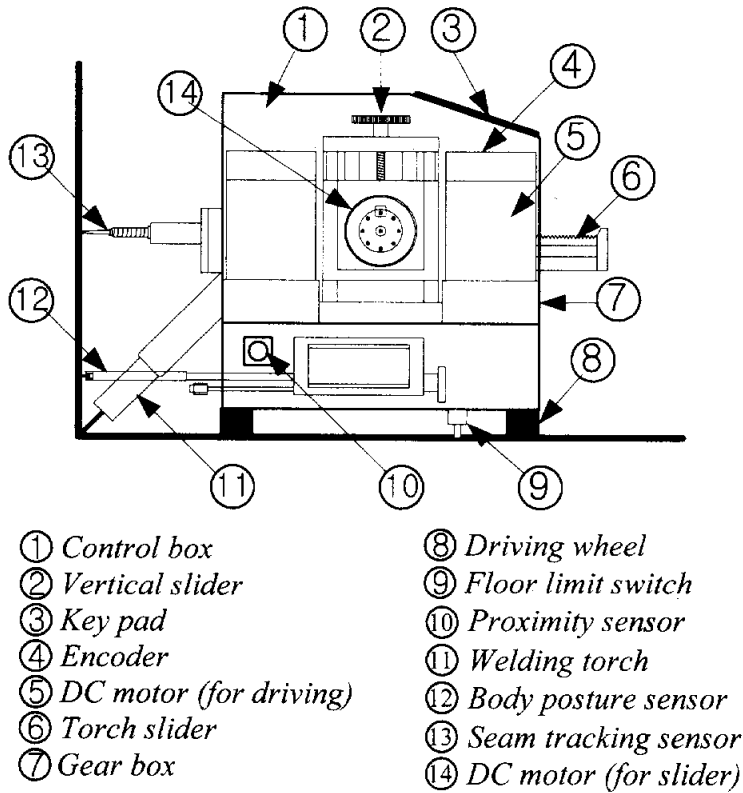


Fig. 3.5 Configuration of the developed lattice welding mobile robot

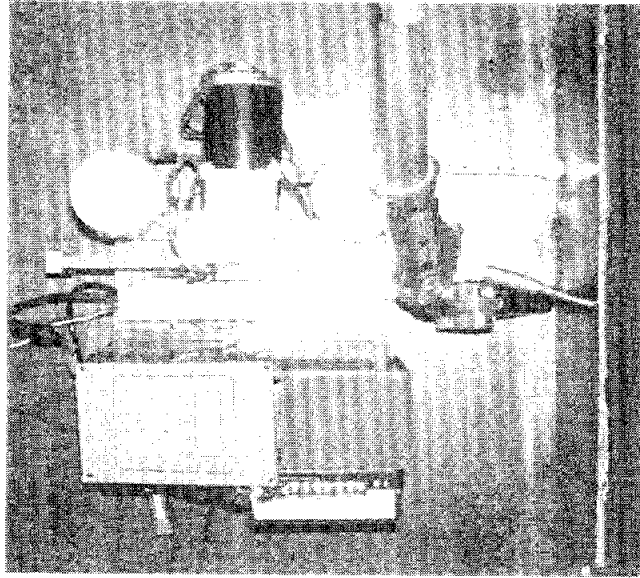


Photo. 3.3 Photograph of the developed lattice welding mobile robot

3.3.1 제어 장치

Fig. 3.6은 격자형 용접 이동로봇의 제어 시스템 구성을 나타낸다. 제어 장치는 주제어부, 구동 제어부, 토치 슬라이더 제어부로 구성된다. 주 제어 장치는 Intel 사의 16bit 원 칩 마이크로프로세서인 80C196KC를 기반으로 개발하였다. 80C196KC의 특징은 CMOS (Complementary metal oxide semiconductor)형으로 저전력이며 고속 CPU 코어에 인터럽트(Interrupt) 관리자, A/D(Analog/digital) 변환기, PWM(Pulse width modulator) 발생기, HSI/HSO(High speed input/output), 타이머, 카운터, 직렬 통신 등이 단일 칩에 장착되어 다양한 제어시스템에 널리 적용되고 있는 CPU이다.

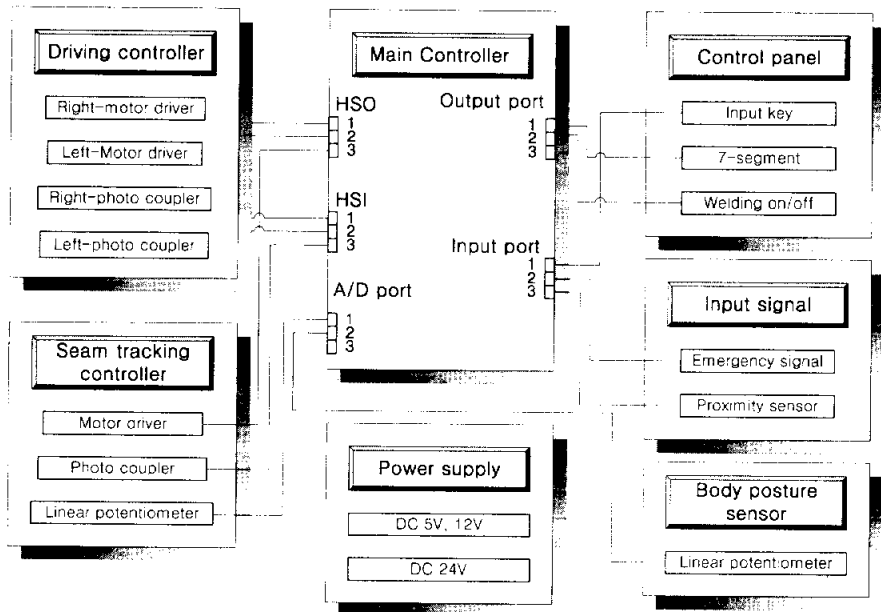


Fig. 3.6 Composition of the controller for lattice welding

좌우 구동바퀴의 속도제어는 CPU가 목표 속도로 연산한 PWM값을 HSO(High speed output) 포트에 출력하고, 구동 제어부의 모터 드라이버가 이 신호를 증폭하여 모터를 구동한다. 또한 용접선 추적 센서로부터 입력된 용접선 이탈 정보에 따라 용접 토치 슬라이더 구동 모터를 제어하여 용접선을 추적한다. HSI(High speed Input) 포트는 주행하는 좌우 구동 바퀴로부터 출력되는 엔코더 신호를 입력받아 구동 바퀴의 속도를 연산하며 토치 슬라이더에서는 모터의 회전수를 카운터하여 토치 슬라이더의 위치를 연산한다. A/D 포트는 토치 슬라이더 제어부의 선형 포텐쇼미터에서 출력되는 아날로그 값(DC 0V~5V)을 입력받아 이동로봇과 용접점까지의 거리를 연산한다. 또한 A/D 포트는 로봇 자세 센서(body posture sensor)에서 출력되는 아날로그 값(DC 0V~5V)을 입력받아 로봇의 자세에 대한 정보를 획득한다. 용접조건 입력은

범용 입출력포트를 이용하였는데 용접조건 입력은 키 패드(key pad)를 사용하고 설정한 용접조건 확인은 어두운 작업 환경에서도 식별이 용이하도록 7-세그먼트를 이용하였다.

3.3.2 구동부

용접 이동로봇은 무거운 용접 케이블을 견인하면서 주행하여야 하기 때문에 강한 구동력이 요구된다. 따라서 모터 축과 구동바퀴의 기어비를 360:1로 채택하였다. 구동바퀴의 소재는 구동바퀴와 바닥간의 충분한 구동 마찰과 용접 주변 열에 의한 열화가 없는 소재가 요구되는데, 본 연구에서는 내열성이 우수한 것으로 알려져 있는 내열 우레탄 수지를 사용하므로 충분한 내열성과 구동마찰력, 내마모성을 얻을 수 있었다. 구동 바퀴는 로봇이 직선주행 및 선회할 수 있도록 로봇의 좌우에 각각 1개가 있으며, 이들 바퀴는 개별적으로 제어된다. 주행용 모터는 정격 전압이 DC 24V, 24W인 모터를 사용하였다. 로봇 본체는 알루미늄으로 제작하여 경량화를 도모하였다.

이동로봇의 형태는 바퀴 수에 따라 일륜, 이륜, 삼륜, 사륜, 오륜 등으로 나뉘어진다. 일반적으로 이륜 형태의 이동로봇은 좌우 양쪽에 개별적으로 제어되는 두 개의 바퀴를 가지며, 로봇의 전방이나, 후방 또는 전후 모두에 자유롭게 구동되는 캐스트 휠(cast wheel)을 가진다. 이 경우 로봇의 주행 및 자세 제어는 좌우 바퀴의 회전 속도 및 방향에 의존한다. 삼륜을 이용하는 이동로봇의 경우는 이동로봇 진행 방향과 수직하는 축상에 구동용 바퀴가 있고, 전방 또는 후방에 진행 방향을 조향할 수 있는 바퀴가 존재하는 형태이다. 사륜의 경우는 자동차의 경우와 같이 전방 또는 후방에 병렬로 각각 두개의 바퀴가 존재하고, 조향을

위해 구동 바퀴가 회전하려는 방향으로 좌우 회전하면서 조향한다. 이때 나머지 두 바퀴는 이끌려 가는 형태이다.

본 연구에서 채택한 이동로봇의 형태는 이륜 형태의 이동로봇인데 로봇의 중심에 구동바퀴가 있어 제자리에서 회전할 수 있는 형태이다. 따라서 격자형 용접에 적합한 형태이다.

이동로봇은 무거운 용접용 케이블을 견인하면서 주행하여야 하기 때문에 설정 방향으로 자세를 유지하면서 주행하기 위해서는 큰 견인력이 요구된다. 그러나 무거운 케이블을 견인할 만큼의 견인력을 얻기 위해서는 이동로봇의 자중이 커져야 되는데, 로봇의 자중이 커질수록 견인력은 증가되지만, 그 만큼 캐리지를 취급하기 곤란해지며, 경제적이지 못하다. 따라서 로봇의 기구적 중심에 전자석을 탑재함으로써, 로봇 자중에 비해 큰 견인력을 확보하였다. 전자석은 영구자석에 비해 다음과 같은 장점이 있다. 영구자석의 경우 항상 로봇의 바닥이 자력을 띠게 되므로 작업자가 이동로봇을 설치하기 곤란할 뿐만 아니라, 철판 등의 작은 이물질이 이동로봇 바닥에 계속 부착되므로 작업자의 지속적인 제거 작업이 요구된다. 하지만, 전자석을 적용할 경우 전원을 차단하면 자력은 사라지고, 모재 철판 위에서 이동로봇의 취급 및 철판 제거가 용이하다.

3.3.3 용접선 추적용 토치 슬라이더

Fig. 3.7은 용접선 추적 센서를 탑재한 토치 슬라이더 및 이동로봇에 부착된 자세 센서(posture sensor)를 나타낸다.

토치 슬라이더는 랙과 피어언 기어로 구동되며 DC 24V 정격의 모터로 위치를 제어한다. 토치 슬라이더의 위치 피드백을 위하여 포터 인

터럽트(photo interrupt sensor)를 이용하였으며, 토치 슬라이더는 용접선 추적 센서가 이동로봇의 기하학적 중심에 위치하도록 설치하였다.

Fig. 3.8은 용접선 추적 센서의 구조를 나타낸 것인데, 용접선 추적 센서의 앞부분에 볼 베어링을 부착하여 모재와 접촉할 때 마찰력을 최소화할 수 있도록 하였고, 센서 앞단에 스프링을 설치함으로써 용접선 추적 센서가 항상 용접 모재와 접촉할 수 있도록 설계하였다.

Fig. 3.9는 자세 센서를 나타낸 것이다. 센서의 앞부분에 모재와의 마찰력을 줄이기 위해 베어링을 부착하였다. 센서의 길이를 조절할 수 있도록 길이 조절 나사를 설치하였고, 용접 모재 및 용접 환경에 따라 길이를 조절할 수 있다. 그리고 센서의 위치 값을 피드백 하기 위해서 포텐서미터를 설치하였다.

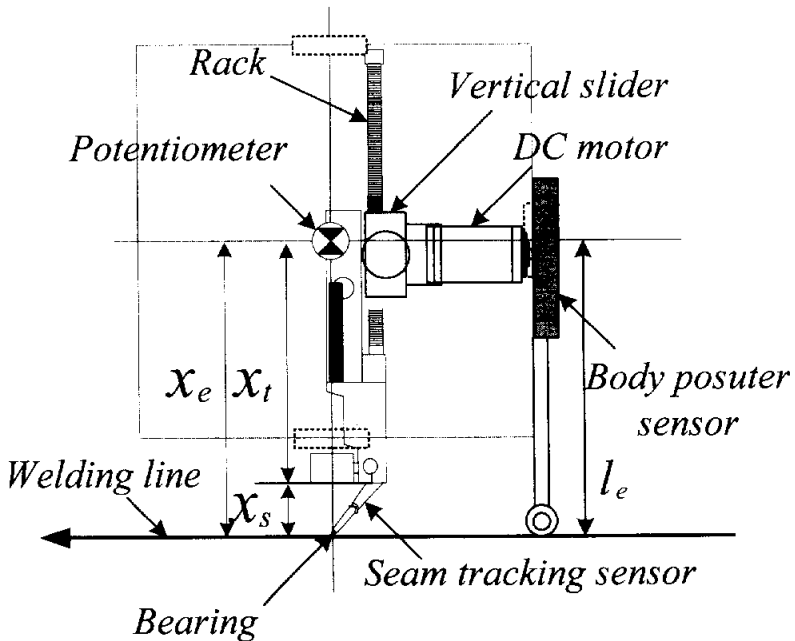


Fig. 3.7 Configuration of torch slider system with seam tracking sensor and posture sensor

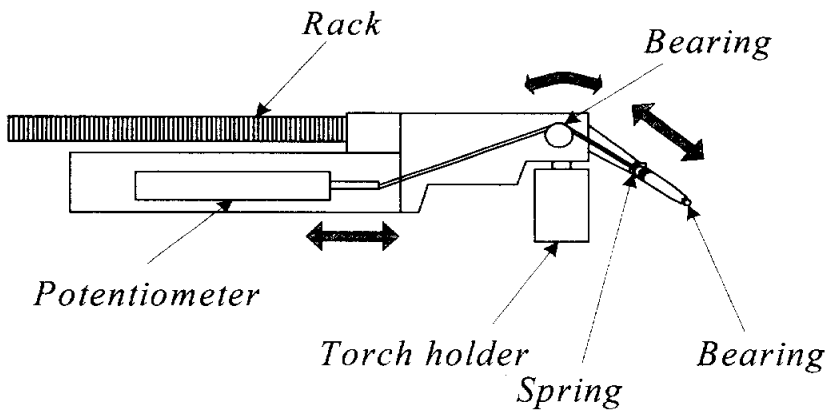


Fig. 3.8 Configuration of seam tracking sensor

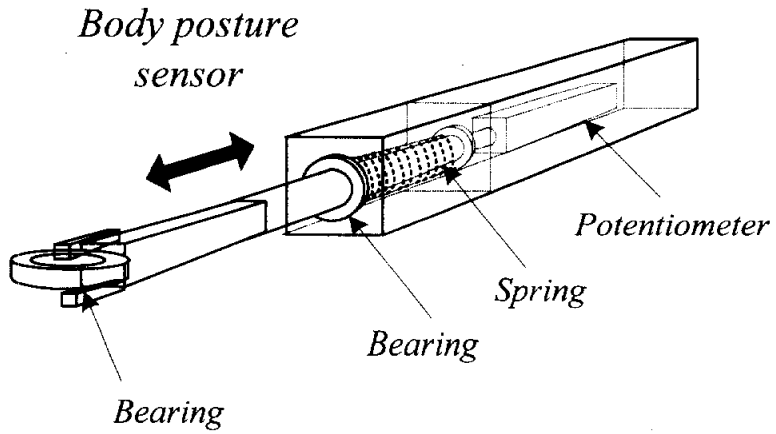


Fig. 3.9 Configuration of posture sensor

3.4 격자형 용접 실험 및 결과

3.4.1 용접 이동로봇의 용접 패턴

Fig. 3.10은 격자형 용접 이동로봇이 박스형태의 격자 용접을 행하는 작업 패턴을 나타낸 것이다. 작업자가 이동로봇을 용접할 박스형 격자 내에 투입시키고, 시작 버튼을 누르면 이동로봇은 Fig. 3.10의 (a)와 같이 전방의 모재 벽면을 행하여 주행한다. 그리고 근접센서가 모재 벽면을 감지하는 순간, 그림 (b)에서와 같이 제자리에서 선회를 시작하여 용접선 추적 센서와 자세 보정센서가 초기값(x_0 , b_0)이 되었을 때 전방으로 전진한다. 그림 (c)에서와 같이 격자의 모서리 부분에서 다시 한번 근접 센서가 모재 벽면을 감지하면 이동로봇은 선회 동작과 동시에 용접을 시작한다. 이 후 격자의 직선부와 모서리부의 용접을 마치면, 그림 (f)와 같이 최초 용접 시작점에서 크레이터 처리를 행한 후 용접을 종료한다. 이와 같이 격자형 이동로봇은 박스형 격자 내에서 직선부 용접 및 네 곳의 격자 모서리부를 연속적으로 용접한다.

3.4.2 용접 실험결과

본 연구에서 개발된 격자형 용접 이동로봇의 용접 성능을 시험하기 위해 Fig 3.11과 같이 용접 시스템을 구성하였다. Table 3.3은 설정 용접 조건이다. Photo 3.4는 개발된 용접 이동로봇이 용접을 수행하는 장면을 나타낸 사진이다.

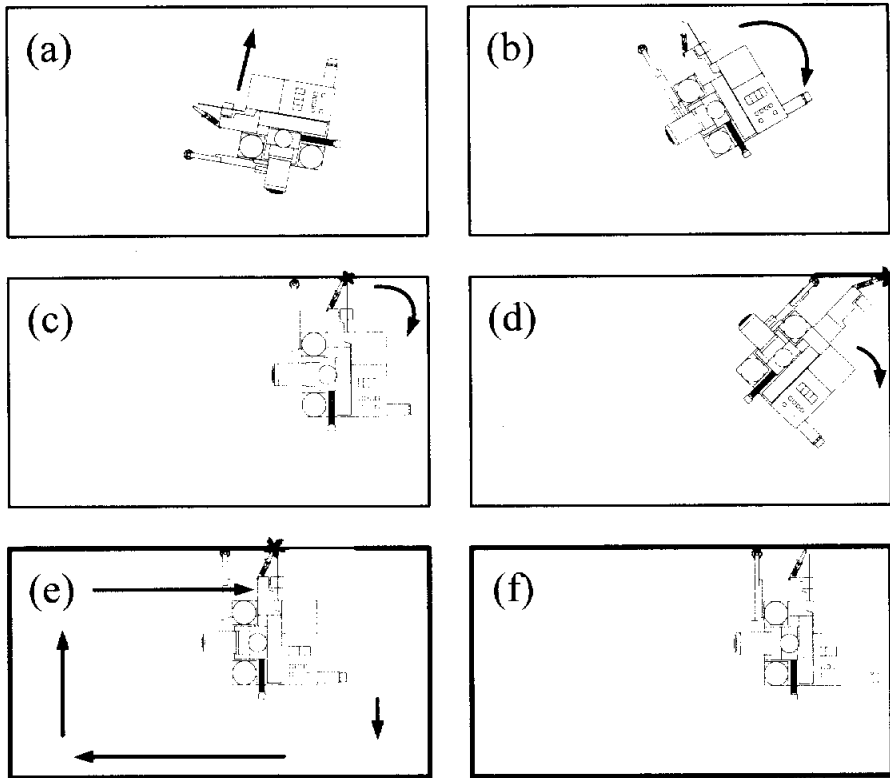


Fig. 3.10 Operating patterns of a mobile robot at a box type of welding

Table 3.3 Welding conditions

Items	Condition
Work piece	1000×1000× 300mm box type
Welding wire	Fixed cored wire
Welding current	240A
Welding voltage	24V
Sliding gas	CO ₂

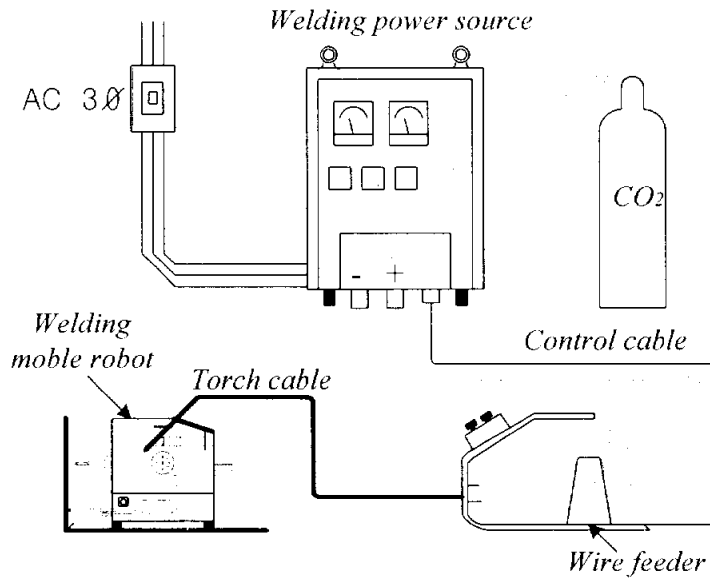


Fig. 3.11 Composition of a lattice welding system

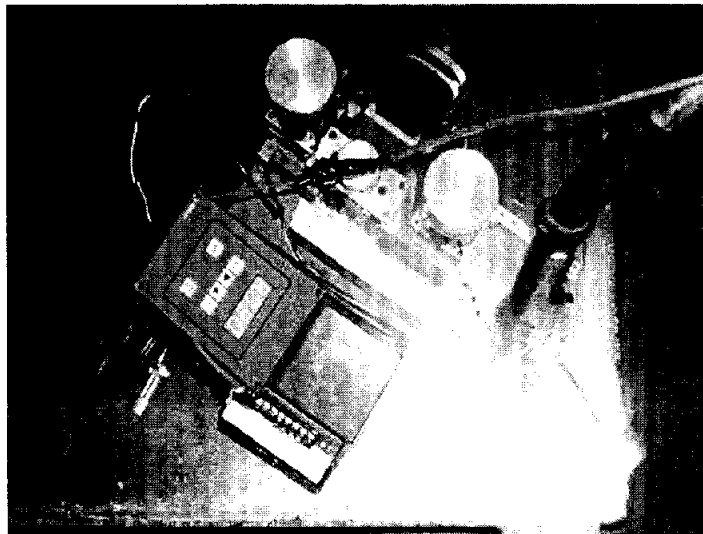


Photo. 3.4 Photograph of the developed welding mobile robot

Fig. 3.12, Fig. 3.13과 Fig. 3.14는 용접 속도 45cm/min 조건에서 격자의 직선부 용접선을 추적하며 용접한 결과를 나타낸다. Fig. 3.12는 좌우 구동바퀴의 속도를 나타낸 것인데, 직선부 용접선 추적을 위해 좌측 구동바퀴의 속도가 일정하게 제어된 것을 볼 수 있으며, 우측 구동바퀴는 로봇의 자세에 따라 구동 속도가 제어된 결과를 볼 수 있다. 용접 시작 후 약 50초 영역에서 우측 구동바퀴의 속도가 다소 변화하는 것을 볼 수 있다. 이것은 로봇의 자세가 요동한 것을 나타낸다. Fig. 3.13은 용접 토치 슬라이더 길이와 자세 센서의 길이를 나타낸 것인데, 50초 구간에서 이동로봇 자세 센서의 길이가 $\pm 5\text{mm}$ 변화한 것을 알 수 있다. 하지만, 용접 토치 슬라이더의 길이 변화가 없는 것으로 보아 용접선을 정확하게 추적하였다. Fig. 3.14는 용접 속도를 나타낸다. 우측 바퀴의 속도가 급격하게 변화한 50초 구간에서 용접속도가 $\pm 2\text{mm/sec}$ 변화한 것을 볼 수 있다.

격자의 직선부 용접을 위한 게인은 $K_{PS}=150$, $K_{IS}=0.5$, $K_{DS}=80$, $K_{PP}=0.8$, $K_{DP}=0.06$, $K_{PT}=0.75$, $K_{DT}=0.06$ 이다. 게인값의 설정은 시행착오법을 이용하였다.

Fig. 3.15, Fig. 3.16과 Fig. 3.17은 용접 속도 45cm/min 조건에서 격자의 모서리 부분을 용접한 결과이다. Fig. 3.15는 이동로봇이 선회할 때 이론적으로 계산되어진 좌우 구동 바퀴의 회전 각속도와 실제 제어된 좌우 구동 바퀴의 회전 각속도를 나타낸다. 점선은 이론적 모델을 이용하여 계산된 좌우측 구동바퀴의 회전 각속도이고 실선 및 이점쇄선은 PD 게인값으로 구한 실제 좌우측 구동 바퀴의 제어입력이다. 이와 같이 이론적으로 구한 회전 각속도와 실제 제어 입력 회전 각속도와의 편차가 발생하는 이유는 이동로봇이 선회할 때 구동 바퀴의 슬립에 의

한 것으로 판단된다. Fig. 3.16은 용접 이동로봇이 격자의 모서리부를 용접할 때 측정된 용접 토치 슬라이더의 길이이다. 모서리부분으로 진입할 때 토치 슬라이더의 길이가 증가되는 것을 볼 수 있으며, 40초 이후 즉 모서리를 빠져 나올 때 토치 슬라이더의 길이가 점점 감소되는 것을 볼 수 있다. Fig. 3.17은 모서리부를 용접할 때 측정된 용접속도를 나타낸 것이다. 전체적으로 용접속도는 안정적이거나, 약 40초 구간에서 용접속도가 다소 상승하는 것을 볼 수 있는데, 이 구간은 모서리를 빠져나가는 시점이다. 격자의 모서리부 용접을 위한 계인을 $K_{PT}=0.65$, $K_{DT}=0.18$ 로 선정하였다.

Photo. 3.5는 격자의 직선부와 모서리부 용접 비드 외관을 나타낸다.

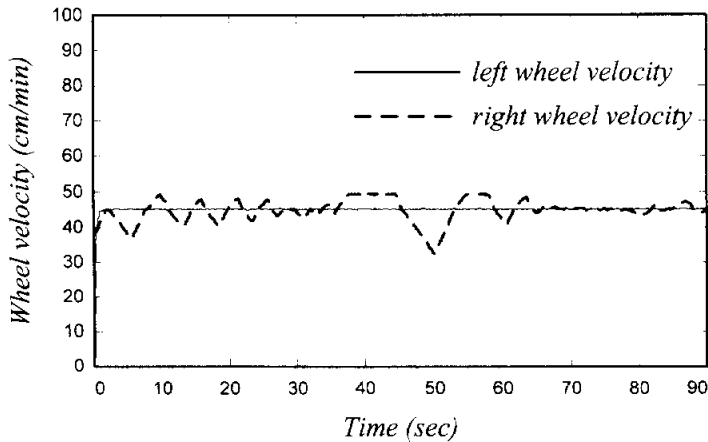


Fig. 3. 12 Velocity of left and right wheels
in straight welding line
(welding speed : 45cm/min)

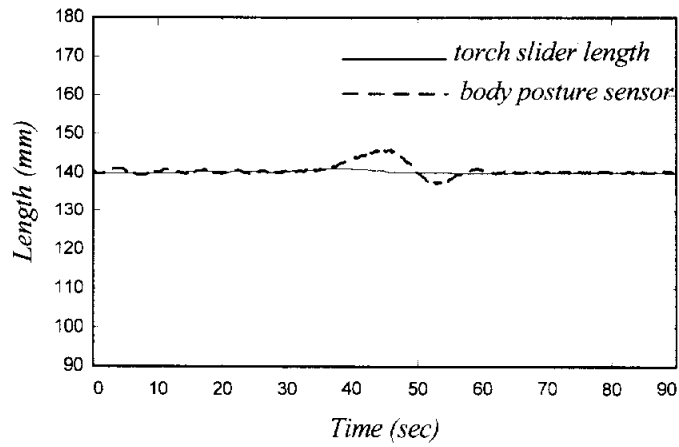


Fig. 3.13 Length of torch slider and body posture sensor in straight welding line (welding speed : 45cm/min)

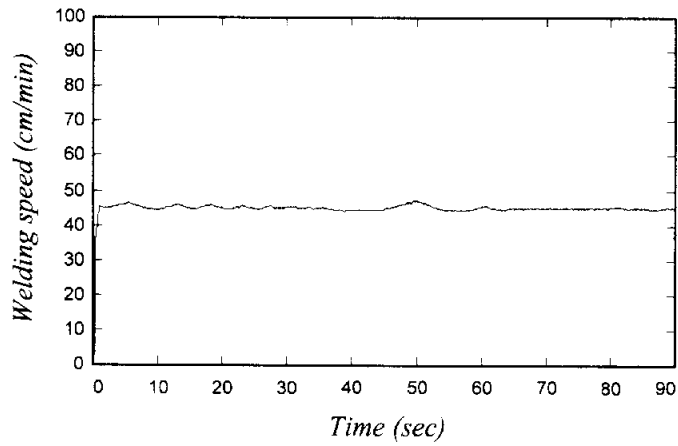


Fig. 3.14 Welding speed in straight welding line (welding speed : 45cm/min)

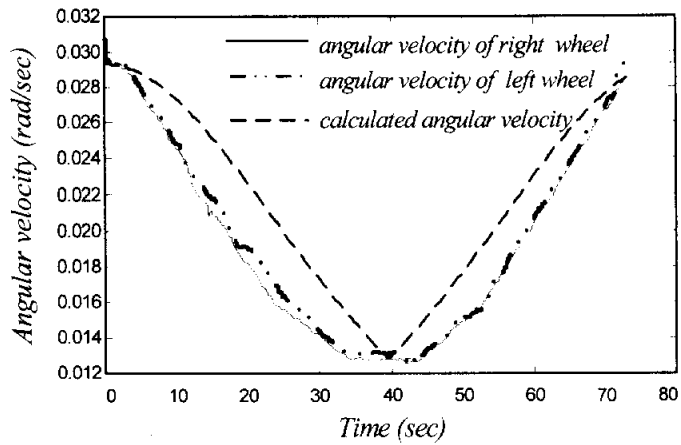


Fig. 3.15 Angular velocity of left and right wheels in turing welding line
(welding speed : 45cm/min)

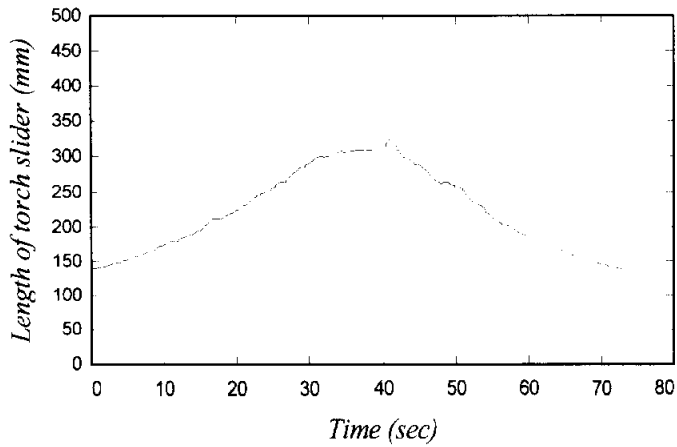
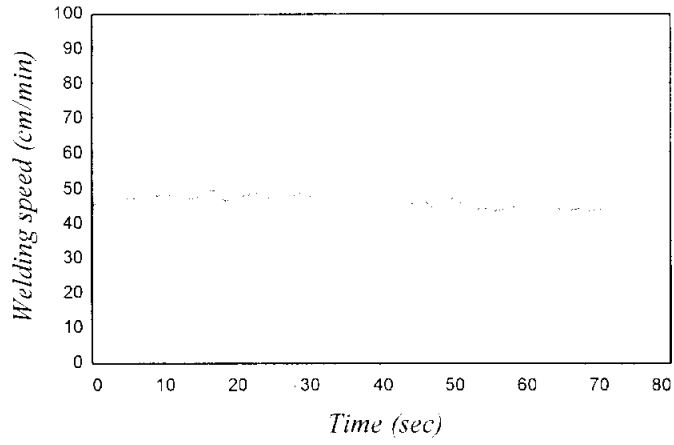


Fig. 3.16 Torch slider length in turing welding line
(welding speed : 45cm/min)



*Fig. 3.17 Welding speed in turning welding line
(welding speed : 45cm/min)*

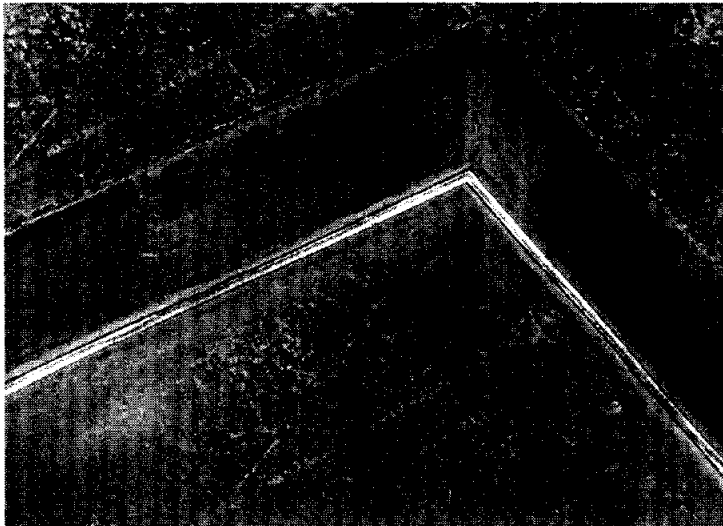


Photo. 3.5 Photograph of the welding bead

제 4 장

자유 곡선형 용접 이동로봇의 개발 및 제어

4.1 서언

본 장에서는 자유 곡선형 용접을 위한 이동로봇의 개발 내용과 자유 곡선형 용접선 추적 센서^[4]를 적용하여 용접선을 추적한 결과를 기술한다. 제어기는 backstepping 제어기법을 이용하여 설계하였고, 모의실험 결과와 실제 용접 실험한 결과를 보인다. 이동로봇의 형태는 이륜형 이동로봇이며, 제어 장치는 Microchip Technology 사의 16F877을 기반으로 설계·개발하였다. 이동로봇은 용접 전에 용접선 경로에 대한 정보 없이, 자유 곡선형 용접선 추적 센서만을 이용하여 용접선을 추적한다.

자유 곡선형 용접은 회전 반경이 고정되어 있지 않고, 자유롭게 변화하는 용접선을 의미한다. 자유 곡선형 용접은 소형 가전제품의 부품에서부터 자동차 부품, 중공업, 조선, 철구조물 조립 공정 등에 다양하게 적용되는 용접형태이다. 일반적으로 소형의 자유 곡선형 용접 모재의 경우는 다관절 로봇 또는 전용 매니플레이터로 행할 수 있으나, 조선 공정 및 철구조물 조립 공정과 같이 모재가 대형인 경우는 넓은 모재 공간을 자유롭게 주행하면서, 용접을 행할 수 있는 이동로봇이 절실히 요구된다. 현재 조선 조립 공정에서 자유 곡선형 용접을 위해 이동로봇을 적용한 사례 및 보고는 없으며, 또한 이러한 자유곡선형 용접은 현재 인력에 의존하여 용접하고 있다.

조선 공정에서 자유 곡선형 용접은 선실의 벽면 및 조타실의 배관용 홀 등이 있다. Photo. 4.1은 선체의 선실 벽면 용접부이다. 선실의 벽면은 강도 향상을 위해 골판 형상의 강판을 사용하는데, 선실 바닥과 벽면 강판의 필릿(fillet) 용접에서 용접선은 곡선형이며, 선실의 종류에 따라 이 회전 반경은 달라진다.

Photo. 4.2는 선박 조타실의 원형 또는 타원형 배관용 홀을 필릿 용접하는 이음부이다. 현재 이러한 공정들은 인력에 의존하여 용접된다. 따라서 본 연구의 목적은 조선 공정에서의 자유 곡선형 용접을 행할 수 있는 이동로봇의 개발과 제어에 있다.

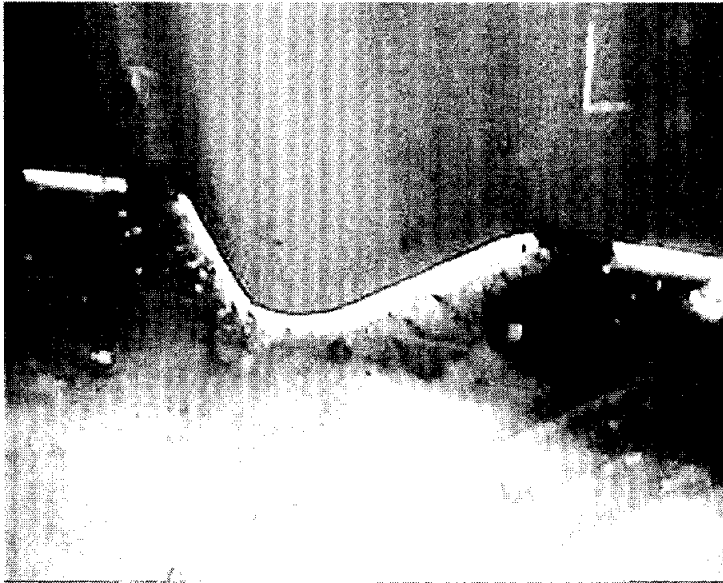
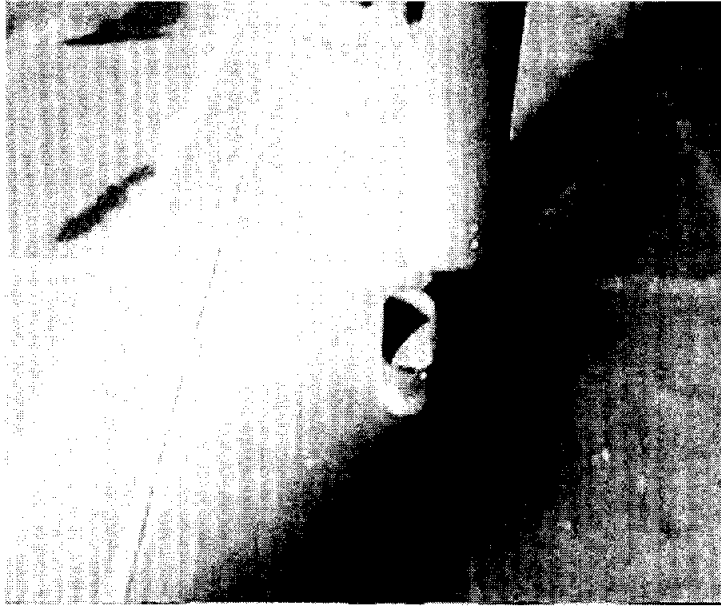


Photo. 4.1 Smooth welding line in a wall of a cabin



*Photo 4.2 Piping hole of elliptical type welding line
in steering room*

4.2 Backstepping법을 이용한 제어 알고리즘

본 절에서는 제 2 장에서 기술한 기구학적 운동방정식, 식(2.40)과 동역학적 운동방정식 식(2.45)을 바탕으로 하여 비선형 제어 기법인 backstepping을 이용하여 제어기를 설계한다.

$$\dot{\zeta} = f(\zeta) + g(\zeta)\eta \quad (2.40)$$

$$\Delta_1 \dot{\eta} = \Delta_2 h(\eta)\eta + k(\eta)u \quad (2.45)$$

여기서 $\zeta \in \mathbb{R}^n$, $\eta, u \in \mathbb{R}^m$, $f \in \mathbb{R}^n$, $g \in \mathbb{R}^{n \times m}$, Δ_1, Δ_2 ($\in \mathbb{R}^{m \times m}$)는 모두 파라미터 θ_{1i} 와 θ_{2i} 를 포함하는 대각 행렬들이다. h 와 k 는 $\mathbb{R}^{m \times m}$ 이며 $k(\eta)$ 는 역행렬이 존재한다.

정리 1:

$K_1 = \text{diag}\{k_{11}, k_{12}, \dots, k_{1n}\}$ 이고 정정행렬이면 식(2.40)을 안정화시키며 다음 식을 만족하는 $\eta = a$ 인 안정화함수 a 가 존재한다.

$$g(\zeta)a = -K_1 \zeta - f(\zeta) \quad (4.1)$$

증명 1:

식(4.1)이 식(2.40)을 만족시키고 ζ 를 안정화시키는 함수 a 라고 하면 $\dot{\zeta} = f(\zeta) + g(\zeta)\eta = f(\zeta) + g(\zeta)a = -K_1 \zeta$ 이므로 $t \rightarrow \infty$ 일 때 $\zeta \rightarrow 0$ 이다.

정리 2: Δ_1 와 Δ_2 가 기지일 경우, 다음의 식(4.2)의 제어칙은 비선형 시스템인 식(2.45)을 안정화시킨다.

$$u = k^{-1}(\eta) [-K_2(\eta - a) - g^T(\zeta)\zeta + \Delta_1 \dot{a} - \Delta_2 h(\eta)\eta] \quad (4.2)$$

단 $K_1 \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 와 $K_2 \in \mathbb{R}^{m \times m}$ 는 각각 정정 대각행렬들이다.

증명 2:

식(4.1)이 성립하면 $\dot{\zeta} = -K_1\zeta$ 으로 안정하다. 식(2.41)에서의 $\eta = \begin{bmatrix} V \\ \phi \end{bmatrix}$ 와 안정화함수 α 의 차를 ε 으로 두면, 비선형 시스템 방정식 (2.40), (2.45)와 (4.2)는 다음과 같다.

$$\dot{\zeta} = f(\zeta) + g(\zeta)(\varepsilon + \alpha) \quad (4.3)$$

$$\Delta_1 \dot{\varepsilon} = \Delta_2 h(\eta)(\varepsilon + \alpha) - \Delta_1 \dot{\alpha} + k(\eta)u \quad (4.4)$$

$$u = k^{-1}(\eta) [-K_2(\eta - \alpha) - g^T(\zeta)\zeta + \Delta_1 \dot{\alpha} - \Delta_2 h(\eta)(\varepsilon + \alpha)] \quad (4.5)$$

리아푸노프 안정성 평가를 위해서 리아푸노프 후보 함수를 다음과 같이 정의한다.

$$V_0 = \frac{1}{2} \zeta^2 + \frac{1}{2} \Delta_1 \varepsilon^2 \quad (4.6)$$

그러면 식(4.3)과 (4.4)를 이용하여 V_0 를 미분하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_0 &= \zeta^T \dot{\zeta} + \varepsilon^T \Delta_1 \dot{\varepsilon} \\ &= -K_1 \zeta^2 + \varepsilon^T [g^T(\zeta)\zeta + \Delta_2 h(\eta)(\varepsilon + \alpha) - \Delta_1 \dot{\alpha} + k(\eta)u] \end{aligned} \quad (4.7)$$

여기서, $K_1 = \text{diag}\{k_{11}, k_{12}, \dots, k_{1n}\}$, $K_2 = \text{diag}\{k_{21}, k_{22}, \dots, k_{2m}\}$ 이고, 정정행렬이므로 식(4.5)를 식(4.7)에 대입하면 다음과 같은 V_0 미분을 만족시키는 정정함수를 구할 수 있다.

$$\dot{V}_0 = -K_1 \zeta^2 - K_2 \epsilon^2 \leq 0 \quad (4.8)$$

Barbalat의 lemma에 의하면 $t \rightarrow \infty$ 일 때 $\zeta \rightarrow 0$ 와 $\epsilon \rightarrow 0$ 이므로 $\epsilon = \eta - \alpha$ 의 정의에 의해 $\eta \rightarrow \alpha$ 와 $\zeta \rightarrow 0$ 이다^[26].

안정화 함수 α 를 구하기 위해 정리1의 식(4.1)과 식(2.39)을 결합하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} -1 & e_2 + l \\ 0 & -e_1 - d \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} \\ &= -K_1 \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_r \cos e_3 - w_r d \sin e_3 \\ v_r \sin e_3 - l + w_r d \cos e_3 \\ \phi_r \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.9)$$

여기서

$$K_1 = \begin{bmatrix} k_{11} & 0 & 0 \\ 0 & k_{12} & 0 \\ 0 & 0 & k_{13} \end{bmatrix}$$

안정화 함수 $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2]^T$ 는 식 (4.9)로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11}e_1 + v_r \cos e_3 - w_r d \sin e_3 + (e_2 + l)\Phi \\ k_{13}e_3 + w_r \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$\varepsilon = \eta - a = \begin{bmatrix} V - \alpha_1 \\ \Phi - \alpha_2 \end{bmatrix}$ 이므로 $\varepsilon \rightarrow 0$ 이면 $\eta \rightarrow a$ 이다. 즉 $V \rightarrow \alpha_1$, $\Phi \rightarrow \alpha_2$ 이다.

이동로봇의 토치 슬라이더 제어칙을 식(4.9)로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} l = & k_{12}e_2 + v_r \sin e_3 + w_r d \cos e_3 \\ & - (e_1 + d)(k_{13}e_3 + w_r) \end{aligned} \quad (4.11)$$

Δ_1 와 Δ_2 가 기지일 경우, 제어 입력 $u = [\tau_r, \tau_l]^T$ 는 정리 2를 이용하여 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} u = \begin{bmatrix} \tau_r \\ \tau_l \end{bmatrix} = & k^{-1}(\eta) [-K_2(\eta - a) - g^T(\zeta)\zeta \\ & + \Delta_1 \dot{a} - \Delta_2 h(\eta)\eta] \end{aligned} \quad (4.12)$$

$$\begin{aligned} \tau_r = & \frac{1}{2} [-k_{21}(V_c - \alpha_1) - k_{22}(\Phi - \alpha_2) + (1-l)e_1 + de_2 \\ & + e_3 + \theta_{11}\dot{\alpha}_1 + \theta_{12}\dot{\alpha}_2 - \theta_2 \Phi(b\Phi - V)] \end{aligned} \quad (4.13)$$

$$\begin{aligned} \tau_l = \frac{1}{2} [& -k_{21}(V - \alpha_1) + k_{22}(\Phi - \alpha_2) + (1+l)e_1 - d e_2 \\ & - e_3 + \theta_{11}\dot{\alpha}_1 - \theta_{12}\dot{\alpha}_2 - \partial_2\Phi(b\Phi + V)] \end{aligned} \quad (4.14)$$

여기서 $K_2 = \begin{bmatrix} k_{21} & 0 \\ 0 & k_{22} \end{bmatrix}$ 이고, θ_{11} 과 θ_{12} 는 식(2.46)에 나타내었고, θ_2 는 식(2.47)에 나타내었다. α 는 식(4.10)을 만족하는 안정화 함수이다. α 의 미분은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\alpha}_1 = & k_{11}\dot{e}_1 - v_r\dot{e}_3 \sin e_3 - \dot{w}_r d \sin e_3 - w_r d \dot{e}_3 \cos e_3 \\ & + (\dot{e}_2 + l)\omega + (e_2 + l)\Phi \\ = & k_{11}\dot{e}_1 - \dot{e}_3(v_r \sin e_3 + w_r d \cos e_3) - \dot{w}_r d \sin e_3 \\ & + (\dot{e}_2 + l)\omega + (e_2 + l)\Phi \\ = & k_{11}\{v_r \cos e_3 - w_r d \sin e_3 - V + (e_2 + l)\Phi\} \\ & - (w_r - \Phi)(v_r \sin e_3 + w_r d \cos e_3) - \dot{w}_r d \sin e_3 \\ & + \{v_r \sin e_3 + w_r d \cos e_3 - (e_1 + d)\Phi\}\Phi + (e_2 + l)\Phi \\ & - (w_r - \Phi)(v_r \sin e_3 + w_r d \cos e_3) \\ & - \dot{w}_r d \sin e_3 + \{v_r \sin e_3 + w_r d \cos e_3 - (e_1 + d)\Phi\}\Phi \\ & + (e_2 + l)\{k_{13}(w_r - \Phi) + \dot{w}_r\} \\ = & -k_{11}V + \Phi\{k_{11}(e_2 + l) + 2(v_r \sin e_3 + w_r d \cos e_3) \\ & - (e_1 + d)\Phi - k_{13}(e_2 + l)\Phi\} + k_{11}v_r \cos e_3 \\ & + w_r\{k_{13}(e_2 + l) - (v_r \sin e_3 + w_r d \cos e_3) - k_{11}d \sin e_3\} \\ & + \dot{w}_r\{(e_2 + l) - d \sin e_3\} \end{aligned} \quad (4.15)$$

$$\dot{\alpha}_2 = k_{13}\dot{e}_3 + \dot{w}_r = k_{13}(w_r - \Phi) + \dot{w}_r \quad (4.16)$$

4.3 자유 곡선형 용접 이동로봇의 설계

자유 곡선형 용접 이동로봇은 제어 장치, 구동장치, 용접선 추적 장치로 구성된다. Photo. 4.3은 개발된 자유 곡선형 용접 이동로봇의 외형을 나타낸 사진이다. Fig. 4.1은 자유 곡선형 용접 이동로봇의 구성을 나타낸다. 제어 장치는 Microchip Technology 사의 16F877을 기반으로 설계 개발하였는데, CPU 보드 내에 모터 드라이버를 내장하는 형태로 설계·개발하였다. 구동부는 격자형 용접 이동로봇과 동일한 이륜 구동 방식이며 경량화를 도모하기 위해 본체는 알루미늄 소재를 채택하였다. 용접선 추적 장치는 회전형 포토셔미터와 선형 포토셔미터를 내장하고 있으며, 이들은 목표 용접선과 현재 용접지점의 각도를 측정하고, 로봇 중심과 용접점까지의 거리 오차를 측정한다.

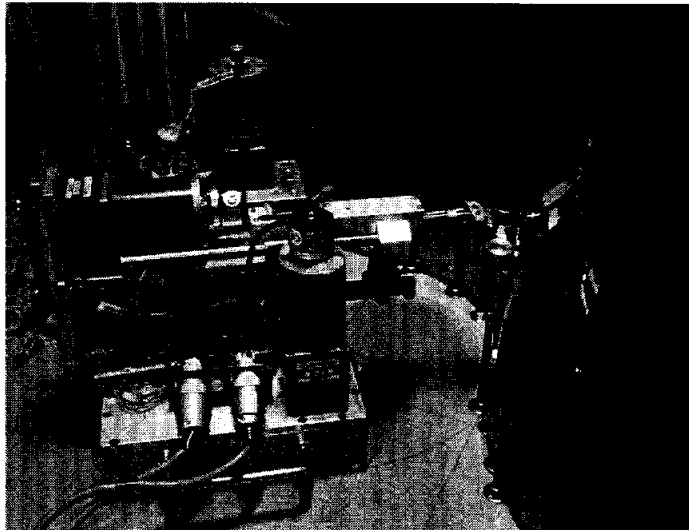
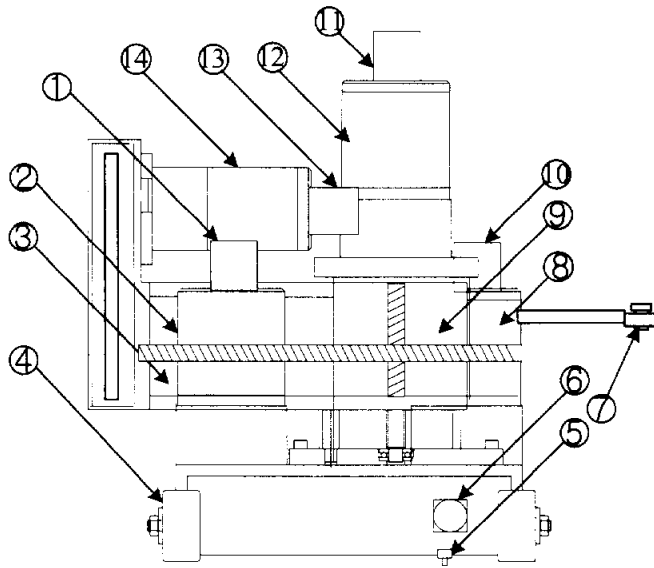


Photo. 4.3 The developed welding mobile robot for smooth curved welding



- | | |
|-----------------------------|------------------------------------|
| ① Encoder (for left wheel) | ⑧ DC motor (for right wheel) |
| ② DC motor (for left wheel) | ⑨ Vertical slider |
| ③ Torch slider | ⑩ Encoder (for right wheel) |
| ④ Driving wheel | ⑪ Encoder (for vertical slider) |
| ⑤ Floor limit switch | ⑫ DC motor (for vertical slider) |
| ⑥ Proximity sensor | ⑬ Encoder (for horizontal slider) |
| ⑦ Seam tracking sensor | ⑭ DC motor (for horizontal slider) |

Fig. 4.1 Configuration of the developed welding mobile robot for smooth curve welding

4.3.1 제어 시스템 구성

Fig. 4.2는 자유 곡선형 용접 이동로봇의 제어 시스템 구성을 나타낸다. 제어장치는 2개의 CPU 보드(CPU 보드-A, CPU 보드-B)와 용접 조건을 입력할 수 있는 조작 패널로 구성된다. CPU 보드는 2개의 PIC 16F877을 내장하고 있고 또한, LMD18200 2개를 내장하고 있으므로 하나의 CPU 보드는 2개의 DC 모터를 개별적으로 제어할 수 있도록 설계·제작하였다.

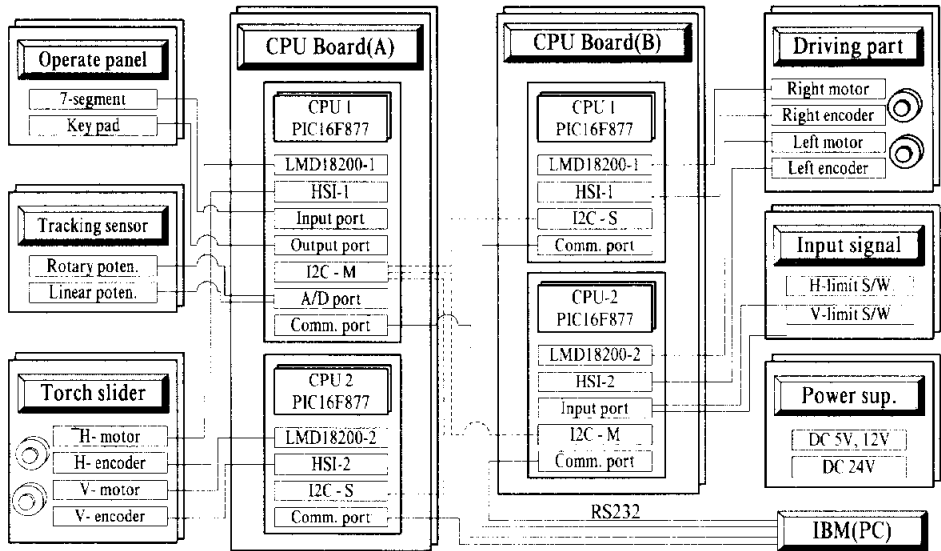


Fig. 4.2 The configuration of the control system for smooth curved welding

Fig. 4.2에서 나타낸 것과 같이 CPU 보드-A의 CPU1이 4개의 CPU 중에서 마스터(maser) 역할을 담당하고, 나머지 CPU들은 슬레이브(slave) 역할을 담당한다. 마스터 역할을 담당하는 CPU 보드-A의 CPU1은 A/D 포트를 이용하여 용접선 추적 센서에서 출력되는 회전형 포텐서미터(potentiometer) 신호와 선형 포텐서미터 신호를 받아 로봇의 자세와 용접선 추적을 위한 정보를 획득하고, 좌우 구동바퀴의 속도를 연산한 후 좌우 구동바퀴의 속도 제어를 담당하는 CPU 보드-B의 CPU1, 2에게 I2C 통신을 이용하여 연산된 속도값을 전송한다.

좌우 구동바퀴의 속도 제어를 담당하는 CPU 보드-B의 CPU1, 2는 마스터 CPU로부터 속도값을 입력 받아 모터 속도를 제어하기 위한 PWM(pluse width modulation)의 듀티비(duty ratio)을 연산하여 DC 모터의 속도를 제어한다. 구동바퀴의 속도 피드백은 좌우 구동 모터에

설치된 엔코더(encoder)를 이용하며, 엔코더의 출력 펄스는 1회전당 360 펄스이다.

용접 조건을 입력하기 위한 조작 패널은 4개의 입력 스위치와 4개의 7·세그먼트(segment)로 구성되며 데이터 입출력은 CPU 보드-A의 CPU1이 담당한다. 제어 장치 및 모터의 전원은 SMPS(switching mode power supply)를 사용하였다.

Photo 4.4는 개발된 제어 장치의 외형을 나타낸 사진이다. Fig. 4.3은 본 연구에서 개발한 제어 장치의 전기 결선도를 나타낸 것이다.

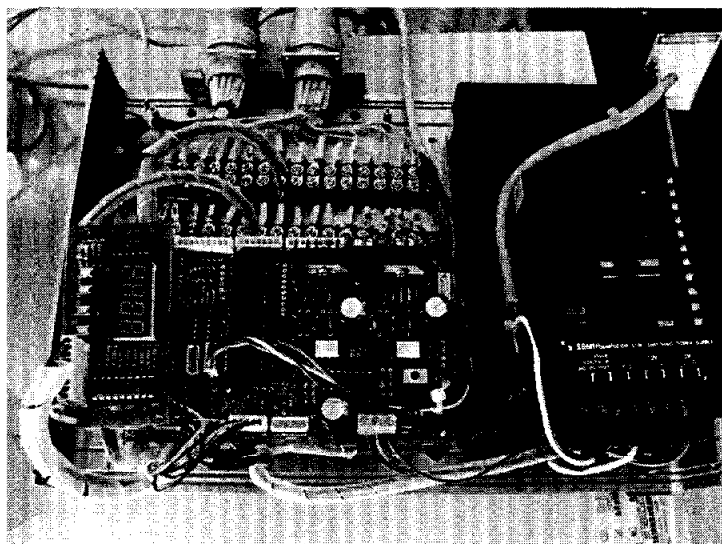


Photo. 4.4 The developed controller board using 16F877

4.3.2 구동 장치

로봇은 두 개의 구동바퀴를 이용하여 용접선 추적 제어와 용접속도를 제어한다. 고정된 두 구동바퀴는 DC 모터에 의해 독립적으로 제어된다. 로봇의 전방과 후방에 자유롭게 움직이는 캐스트 휠(cast wheel)을 설치하였다.

바퀴 구동을 위한 모터는 DC 24V 15W의 모터를 채택하였고, 기어비를 360:1로 선정하였다. 모터에서 바퀴까지의 동력 전달은 백래쉬를 최소화하기 위해 체인 방식이 아닌 4개의 베벨 기어가 조합된 형태로 설계·제작하였다. 용접 토치의 견인력 확보를 위해 영구자석을 로봇 본체 중심에 설치하였다. 안전장치로서는 전방의 장애물과의 충돌을 방지하기 위해서 근접 스위치를 설치하였으며, 추락 방지를 위해 로봇 바닥에 리미트 스위치를 설치하였다.

4.3.3 용접선 추적 센서

본 연구에서 적용한 자유곡선형 용접선 추적 센서는 부경대학교 CIMEC 연구실의 Tien, Hieu와 Lam이 개발한 것이다^[4]. 용접선 형상의 사전 정보 없이, 완전한 자유곡선의 용접선을 추적하기 위해서는 용접선과 이동로봇 자신의 위치 관계로부터 목표 위치 및 자세를 결정하여야 하는데, 자유곡선형 용접 이동로봇은 사전에 용접선 경로에 대한 정보가 없는 상태이므로 용접 진행 중 용접선에 대한 정보를 획득하는 것이 중요한 과제이다.

Fig. 4.4는 자유 곡선형 용접선 추적 센서를 이용하여 용접선 추적 오차 e_i 를 획득하는 방법을 나타낸 것이다. 자유곡선형 용접선 추적 센서는 2개의 포텐서미터(linear potentiometer)를 내장하고 있다. O_1 를

러 내부에 회전형 포텐서미터가 내장되어 있는데 이것은 다음 목표 용접점 R 에 위치한 O_2 롤러와 이루는 각도를 측정하며 이 값을 e_3 라 한다. 즉, 현재 용접점과 다음 목표 용접점의 각도를 측정하는 것이다. 이동로봇의 진행각도와 평행하게 O_1 과 O_2 가 위치한다면 용접선과 이동로봇은 평행한 상태이고, e_3 은 0이 된다. 그리고 현재 용접점과 다음 목표 용접점 사이에 각도 오차가 발생하면 O_1 롤러와 O_2 롤러 사이에 e_3 가 발생한다.

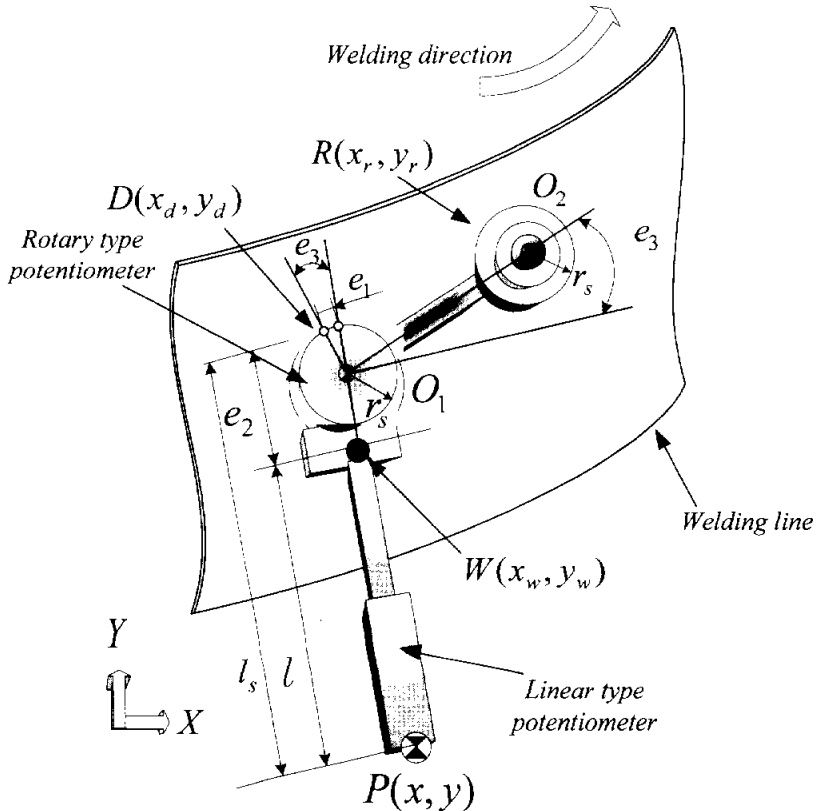


Fig. 4.4 Acquisition of the tracking errors of smooth curved welding line

O_1 롤러와 O_2 롤러 사이에 스프링이 설치되어져 있기 때문에 항상 O_2 롤러가 필릿의 상판 벽면에 접촉된 상태로 이동로봇은 주행하며 또한 O_1 롤러와 토치 슬라이더 사이에 스프링이 있어 O_1 롤러 역시 항상 필릿의 상판 벽면에 접촉된 상태를 유지한다.

용접 토치가 부착된 토치 슬라이더의 길이가 고정되어져 있기 때문에 용접선에서 이동로봇이 멀어지게 되면 O_1 롤러는 스프링의 힘으로 필릿의 벽면으로 진행하지만, 용접토치는 용접점까지 진행하지 못하는 상태가 된다. Fig. 2.3과 Fig. 4.4에서 나타낸 것과 같이 현재 용접이 이루어지고 있는 지점은 W 점이고 실제 용접이 이루어져야할 지점은 D 점이다. 이와 같이 이동로봇의 위치 오차로 인해 용접점의 오차가 발생하는데 이 오차값은 토치 슬라이더에 설치된 선형 포텐서미터로 측정하며, 이 오차값을 e_2 로 정의한다. 즉 e_2 는 이동로봇의 중심에서 용접점까지의 거리 오차이다.

필릿 용접에서 용접 토치가 용접 진행방향과 이루는 각도(토치 진행각)는 90° 를 표준으로 하며 통상 중/저 전류 영역에서 $\pm 10^\circ$ 범위까지 허용한다. Fig.4.4에서 W 와 D 가 일치하더라도 진행각의 오차가 발생하게 되고, 이 때 진행각이 90° 인 접촉점과 실제 용접이 이루어지고 있는 D 지점까지는 e_1 만큼의 거리 오차가 발생한다.

Photo 4.5는 자유곡선형 용접선 추적 센서의 실물 사진이다.

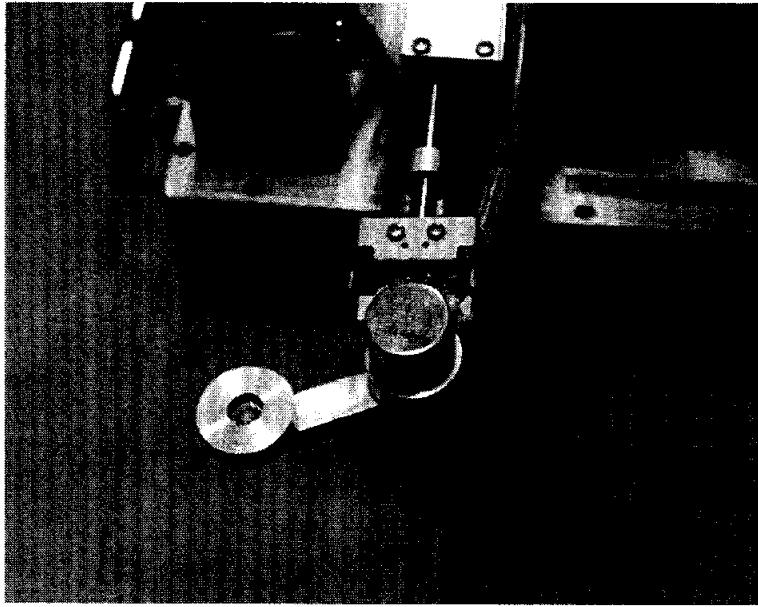


Photo. 4.5 The smooth welding line seam tracking sensor

4.4 모의실험 및 실험 결과

4.4.1 용접선 추적을 위한 모의실험 및 실험 결과

본 절에서는 4.2절에서 설계한 제어기를 모의실험한 결과와 실제 용접 경로를 추적한 결과를 보인다. 모의실험은 MATLAB을 이용하였다. Table 4.1은 모의실험을 위한 이동로봇의 초기 파라미터 값이고, Table 4.2는 이동로봇의 물리적인 파라미터 값이다.

목표 용접 경로는 Fig. 4.5와 같이 설정하였고, 목표 용접속도는 7.5 [mm/sec]이며 제어기 상수들은 $k_{21} = k_{22} = 10$, $k_{11} = 4.2$, $k_{12} = 8$, $k_{13} = 3.4$ 이다. 모의실험 결과와 실제 용접선 경로 추적 성능을 비교하기 위해 Fig. 4.5와 같은 용접 경로를 실물로 제작하였다. Photo 3.6은 제작된 용접 경로를 나타낸다.

Table 4.1 The initial parameters for numerical simulation

Initial parameters	Value [unit]
x_r	300[mm]
x_w	105[mm]
V	0[mm/sec]
l	150[mm]
y_r	100[mm]
y_w	105[mm]
Φ	0[rad/sec]
ϕ	0.5[rad]
v_l	0[mm/sec]
v_l	0[mm/sec]

Table 4.2 The physical parameters for numerical simulation

Parameters	Values [unit]
b	125[mm]
m_c	16.9[kg]
I_w	3.75×10^{-4} [kgmm ²]
D	0.01[mm]
m_w	0.3[kg]
R	26[mm]
I_c	0.2081[kgmm ²]
I_m	4.96×10^{-4} [kgmm ²]

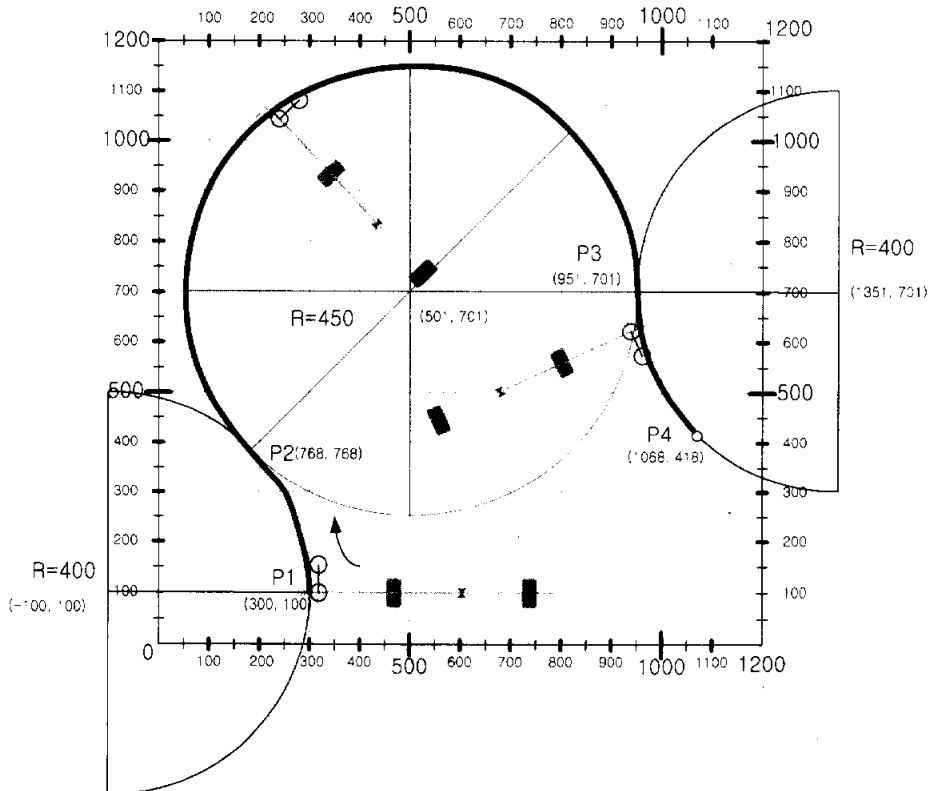


Fig. 4.5 The reference welding path[mm]

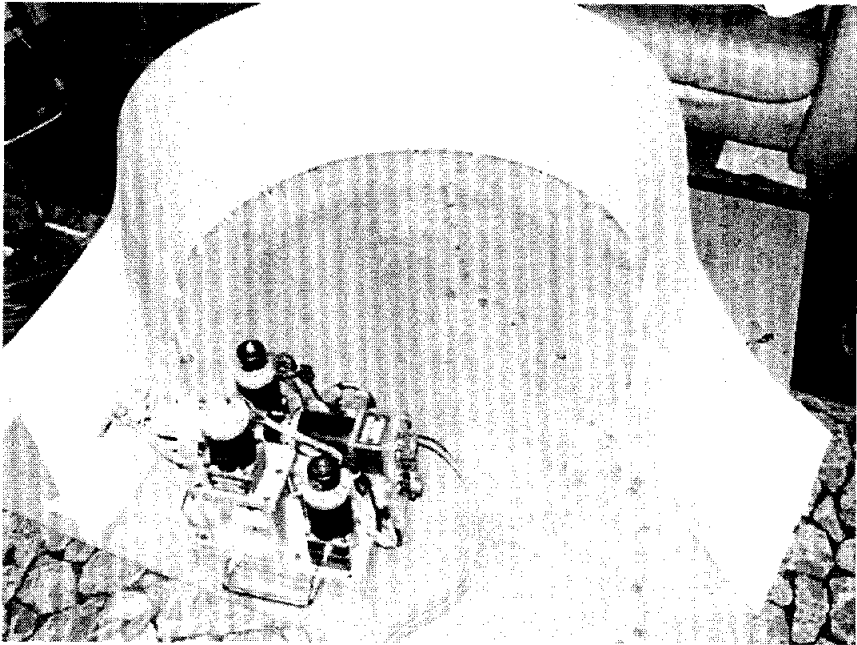


Photo. 4.6 Practical welding path for seam tracking experiment

기준이 되는 용접 시작 좌표는 (300, 100)인데 출발 초기에 용접선 추적 성능을 알아보기 위해 시작점을 X 축 방향으로 +5mm, Y 축 방향으로 +5mm 오차를 준 상태에서 이동로봇을 출발시킨다. 즉 좌표 상에서 (305, 105) 위치에서 주행로봇을 출발한다. Fig. 4.6은 전 용접경로에서 발생한 모든 오차값 e_i 의 모의실험 결과를 나타낸 것이다. e_1 , e_2 , e_3 값 모두 안정적으로 0에 수렴된 것을 볼 수 있다. 하지만, 초기 시작점이 오차를 가지고 출발하기 때문에 초기에 약간의 오차를 볼 수 있는데, Fig. 4.7은 0초에서 2초까지의 오차값을 나타낸 것이다. 약 0.25초 후 모든 오차값이 0으로 수렴된 결과를 볼 수 있다.

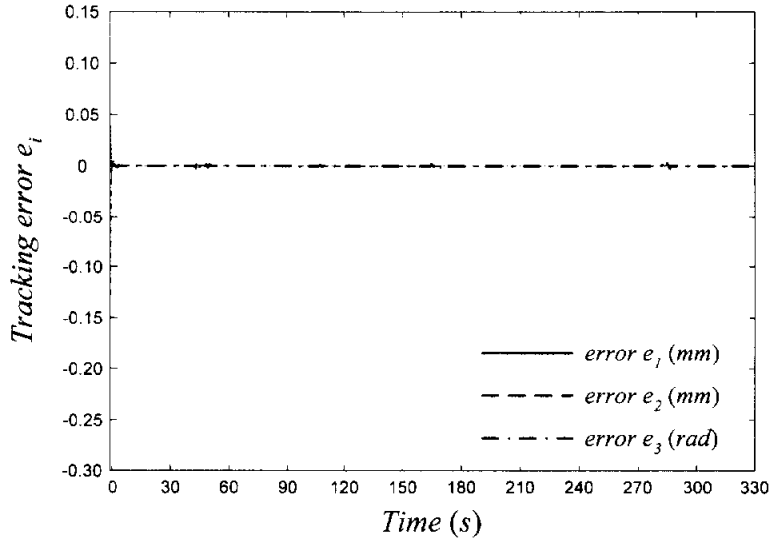


Fig. 4.6 Simulation result of tracking errors

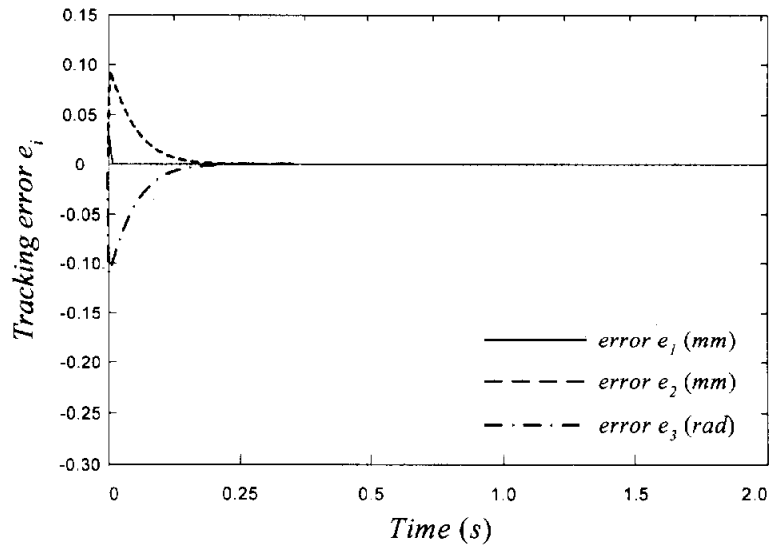


Fig. 4.7 Simulation result of tracking errors at beginning

Fig. 4.8은 e_2 의 모의실험 결과와 실제 용접 경로를 주행하면서 측정한 e_2 를 나타낸 것이다. 양 방향으로의 오차는 용접토치 끝단 즉 용접점이 목표 용접선까지 도달하지 못하고, 센서만이 필릿의 상판 쪽으로 돌출된 길이 값을 의미하는데 이러한 오차값은 실제 용접시 필릿의 아래쪽을 용접하는 결과를 가져온다. 반면 음의 방향으로의 오차는 센서가 이동로봇의 중심으로 밀려들어온 길이 값을 의미한다. 즉 이동로봇이 필릿 벽면 쪽으로 접근한 상태이며, 이러한 오차값은 실제 용접에서 필릿의 상판 측을 용접하는 결과를 가져온다. 따라서 e_2 는 용접시 필릿의 각장에 큰 영향을 미치는 오차값이다. 실제 용접선 경로 추적 실험에서 e_2 가 최고 많이 변동하는 시점이 약 42초 영역인데 이 구간은 Fig. 4.5에서 나타난 용접 경로에서 P2 지점에 해당된다. 로봇이 초기에 시계반대 방향으로 회전하며 경로를 추적하다가, P2 지점에서 시계 방향으로 회전 방향을 전환하는데 이 때 약 $\pm 0.01\text{mm}$ 의 오차가 발생한다. 또한, 275초 시점 즉 P3 지점에서도 로봇의 회전 방향이 전환되므로 P2 지점과 같이 약 $\pm 0.01\text{mm}$ 의 오차가 발생한 결과를 볼 수 있다. 용접선 경로 추적 실험 결과 필릿의 기준 용접점에서 상판 쪽으로 그리고, 하판 쪽으로 약 $\pm 0.01\text{mm}$ 오차가 발생한 결과를 얻었다. $\pm 0.01\text{mm}$ 의 각장 오차는 용접 품질에 영향을 미치지 않는 범위이므로 용접선 경로 추적은 우수하다 할 수 있다.

Fig. 4.9는 e_3 의 모의실험 결과와 실제 용접선을 추적하면서 측정한 데이터를 나타낸 것이다. 이 결과 역시 e_2 와 마찬가지로 P2 지점과 P3 지점에서 약 $\pm 0.05\text{rad}$ 의 오차가 발생한 것을 볼 수 있다.

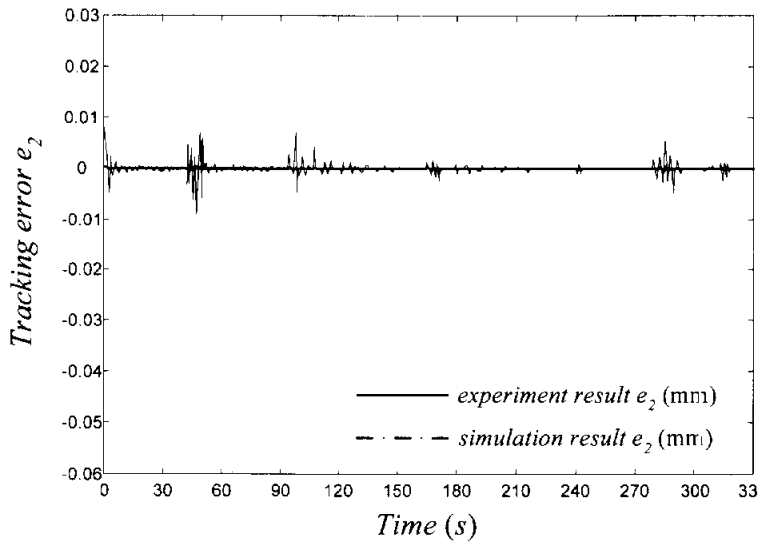


Fig. 4.8 Simulation and experiment results of e_2

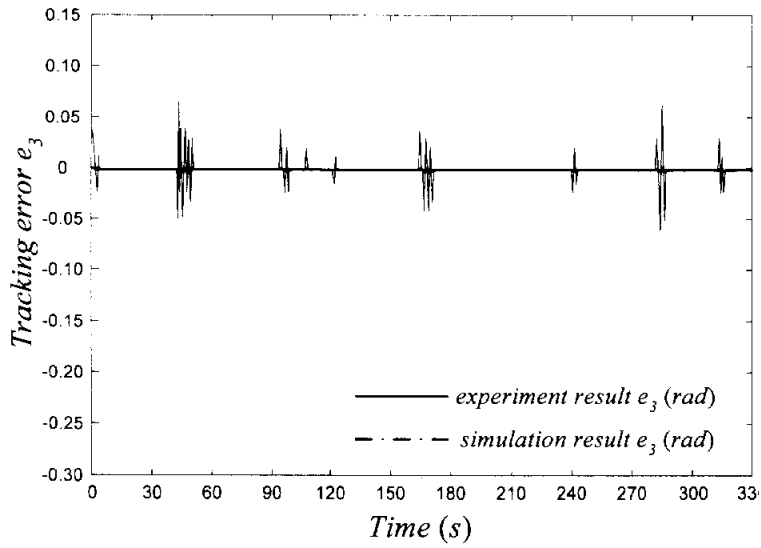


Fig. 4.9 Simulation and experiment results of e_3

Fig. 4.9는 목표 용접 경로와 이동로봇 중심의 목표 경로를 나타낸 것이다. 점선은 목표 용접 경로를 나타낸 것이고, 실선은 이동로봇의 중심 경로를 나타낸 것이다. 이동로봇은 주행 중 e_3 의 값을 측정하면서, 다음 목표 용접점의 경로를 판단하고 로봇의 좌우 구동바퀴의 속도를 제어하여 용접선을 추적한다.

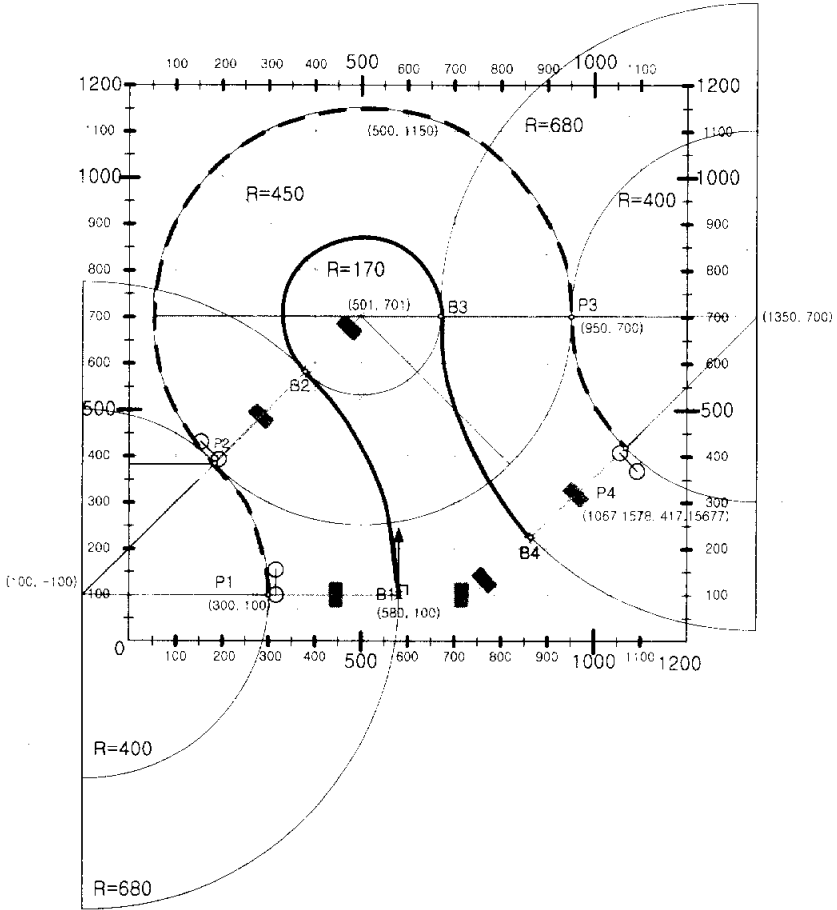


Fig. 4.9 Reference welding path and reference driving path of mobile robot center

Fig. 4.10은 우측 구동바퀴 속도의 모의실험 결과를 나타낸 것이고, Fig. 4.11은 좌측 구동바퀴 속도의 모의실험 결과를 나타낸 것이다. P2 지점과 P3 지점에서 이동로봇의 회전 방향이 전환되므로, 좌우 구동바퀴의 속도는 큰 폭으로 변화되는 것을 볼 수 있다. Fig. 4.12는 이동로봇의 전진 속도를 모의실험한 결과를 나타낸 것이다. 이 결과 역시 P2 지점과 P3 지점에서 속도의 급격한 변화를 볼 수 있다. 이동로봇이 곡선의 용접선을 추적할 때 원의 내부에서 용접선을 추적할 경우 이동로봇의 전진 속도는 목표 용접 속도보다 낮은 속도로 주행한다. 반면 원의 외부에서 이동로봇이 용접선을 추적할 경우, 전진 속도는 기준 용접 속도보다 높은 속도로 주행하여야 한다. 목표 용접 속도가 7.5mm/sec이고 반경이 400mm인 원의 바깥 부분을 용접할 때 즉, P1에서 P2 지점까지 이동로봇은 12.75mm/sec의 속도로 주행하고, 반경이 450mm인 원의 안쪽을 용접하는 P2에서 P3지점까지 이동로봇은 2.833mm/sec로 주행한다.

Fig. 4.13은 이동로봇의 회전 각속도를 모의실험한 결과이고 Fig. 4.14는 용접 속도를 모의실험한 결과이다. 용접 이동로봇의 회전 방향이 전환되는 P2와 P3 지점에서 $\pm 0.5\text{mm/sec}$ 의 오차가 발생하지만, 전체적으로 용접속도는 균일하게 목표 용접속도 7.5mm/sec를 유지하는 것을 볼 수 있다. Fig. 4.15와 Fig. 4.16은 주어진 용접 경로를 주행하면서 측정된 우측과 좌측 구동바퀴의 속도를 나타낸다. Fig. 4.17은 이동로봇 중심의 전진 속도를 나타낸다. P2 지점에서 속도가 약 1mm/sec까지 하강하는 것을 볼 수 있지만, 전반적으로 안정적인 속도를 유지함을 알 수 있다. Fig. 4.18은 이동로봇의 회전 각속도를 나타내며, Fig. 4.19는 용접점의 실제 용접 속도를 나타낸다. P2 지점과 P3 지점에서 용접속도가 $\pm 0.3\text{mm/sec}$ 로 변화됨을 볼 수 있다. 용접 공정에서 $\pm 0.3\text{mm/sec}$ 의 용접속도 편차는 허용 범위 내의 편차이다.

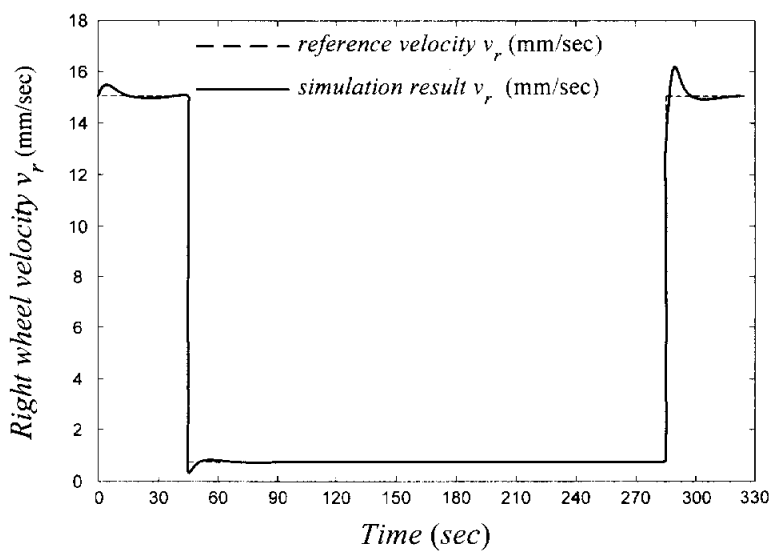


Fig. 4. 10 Simulation result of v_r

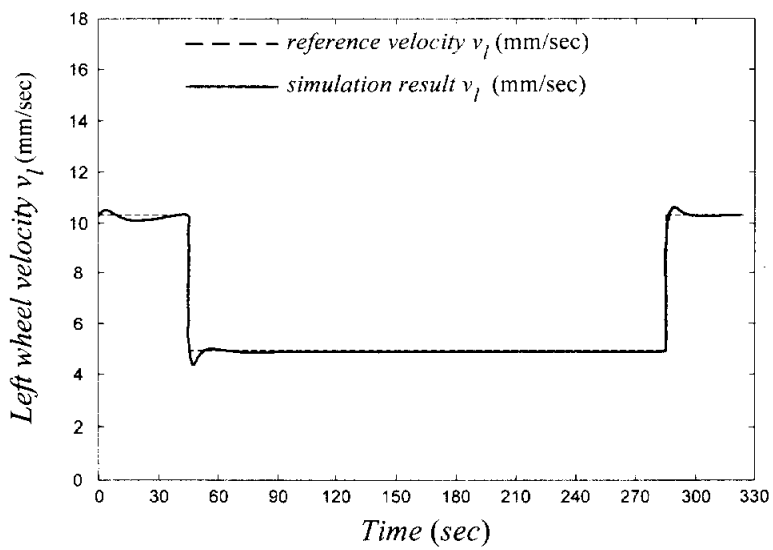


Fig. 4. 11 Simulation result of v_l

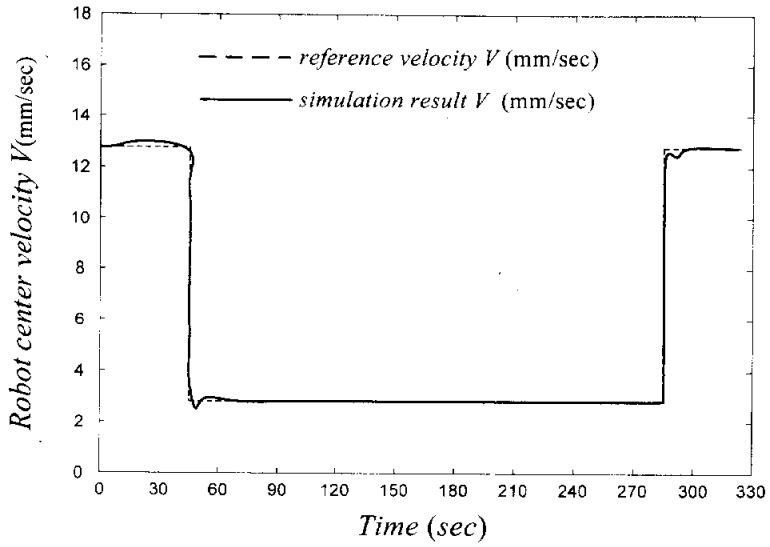


Fig. 4. 12 Simulation result of V

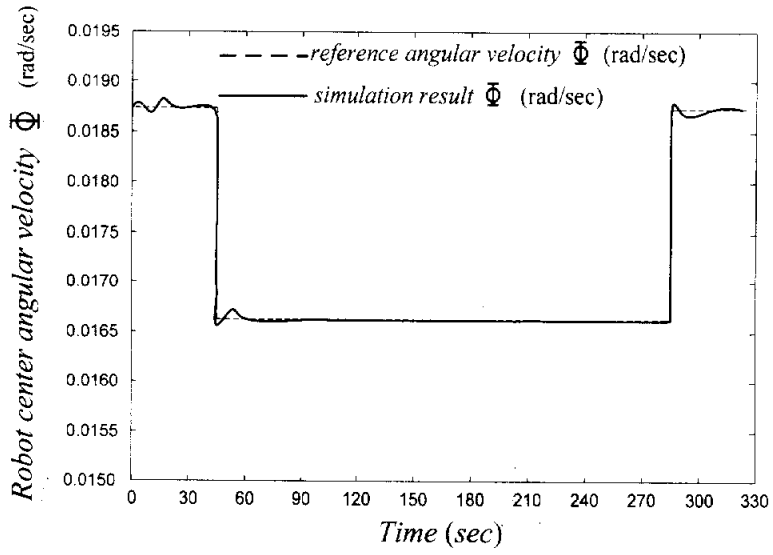


Fig. 4. 13 Simulation result of Φ

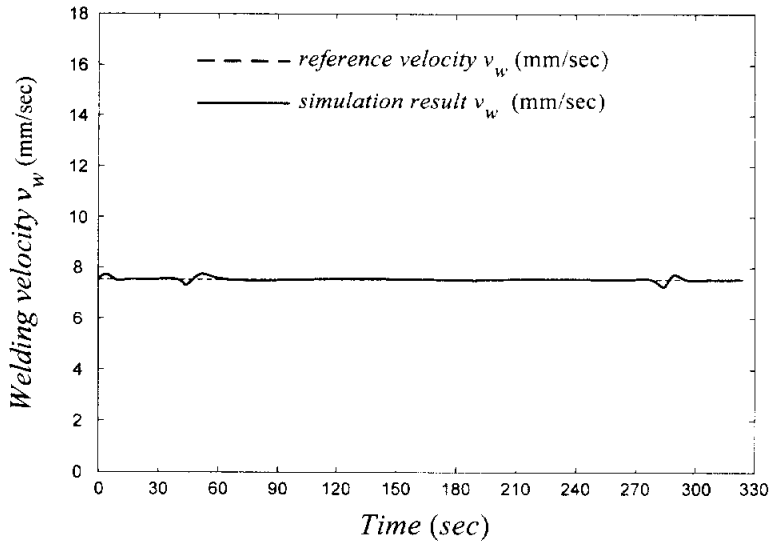


Fig. 4.14 Simulation result of v_w

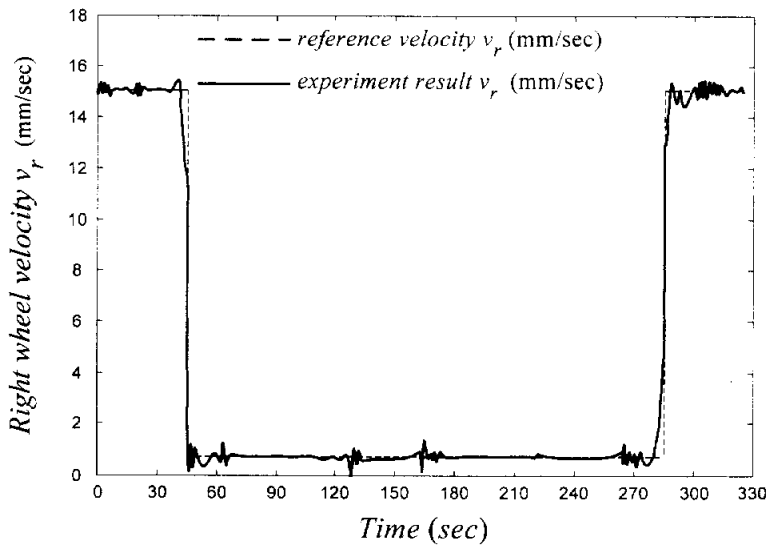


Fig. 4.15 Experiment result of v_r

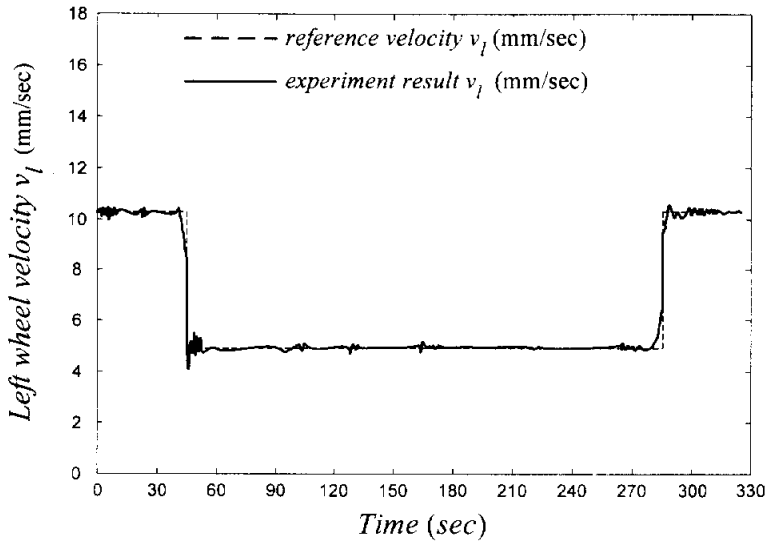


Fig. 4.16 Experiment result of v_l

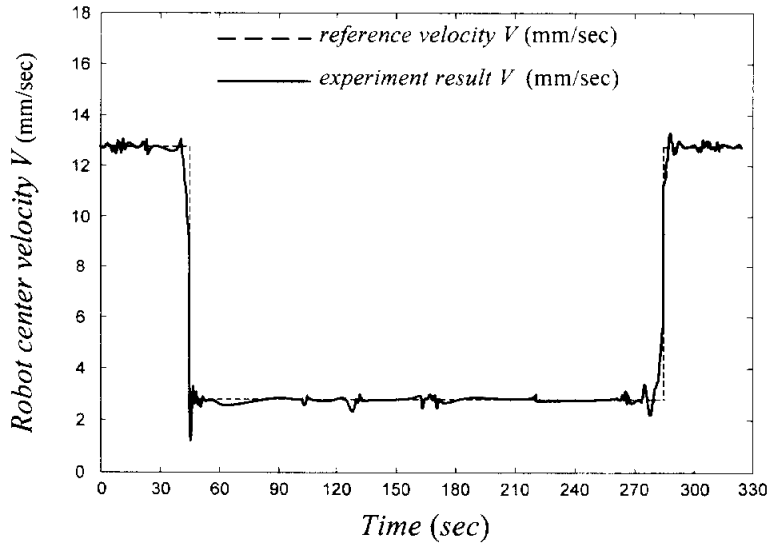


Fig. 4.17 Experiment result of V

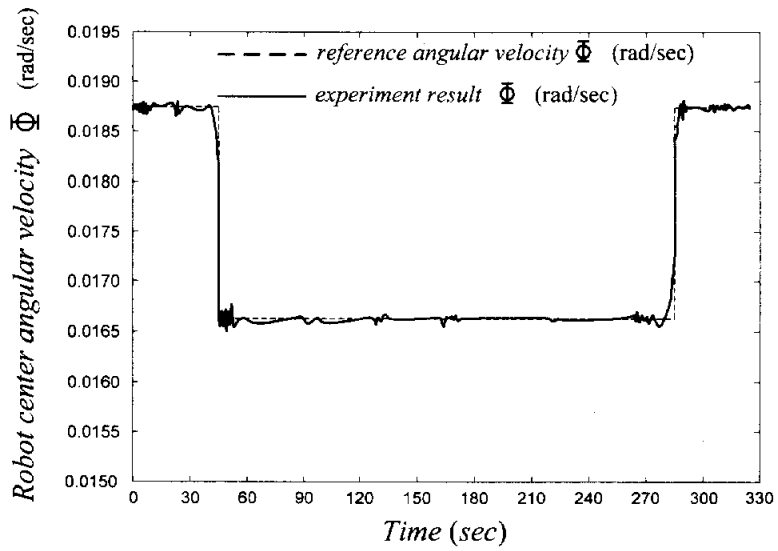


Fig. 4.18 Experiment result of Φ

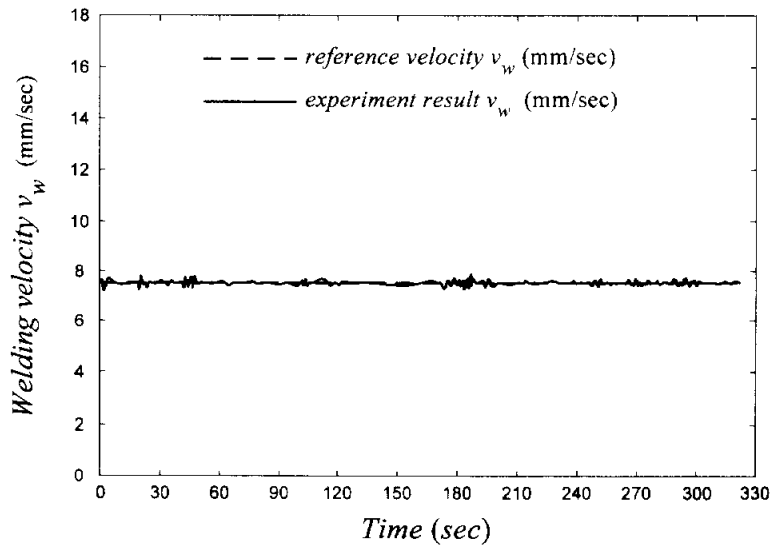


Fig. 4.19 Experiment result of v_w

4.4.2 용접 실험 결과

자유곡선형 용접 이동로봇의 용접선 추적 성능을 실험하기 위해 Table 4.3과 같은 용접 조건으로 용접을 시행하였다. Photo. 4.7은 자유곡선형 용접 이동로봇이 용접하는 장면이다. Fig. 4.20은 목표 용접선을 나타낸 것이다. 용접선(A)는 곡선의 바깥쪽을 용접하는 용접선이고, 용접선(B)는 곡선의 안쪽을 용접하는 용접선이다. Photo 4.8은 용접선(A)를 용접한 후의 비드 외관을 나타낸 것이다. Photo 4.9는 용접선(A)의 끝단부분 비드 외관을 나타낸 사진이다. 용접 슬래그(slag)가 균일하게 그리고 잘 떨어져 나온 것으로 보아 용접 중 아크가 안정적으로 발생한 것으로 판단된다. 또한, 모재에 부착되는 스패터(spatter)는 없었다. 목두께 및 각장은 각장 게이지를 이용하여 측정하였다. Fig. 4.21은 용접선(A)를 용접한 후 측정한 비드의 목두께(throat depth)를 나타낸 것이다. Fig. 4.22는 수평 각장을 나타내고, Fig. 4.23은 수직 각장을 나타낸다.

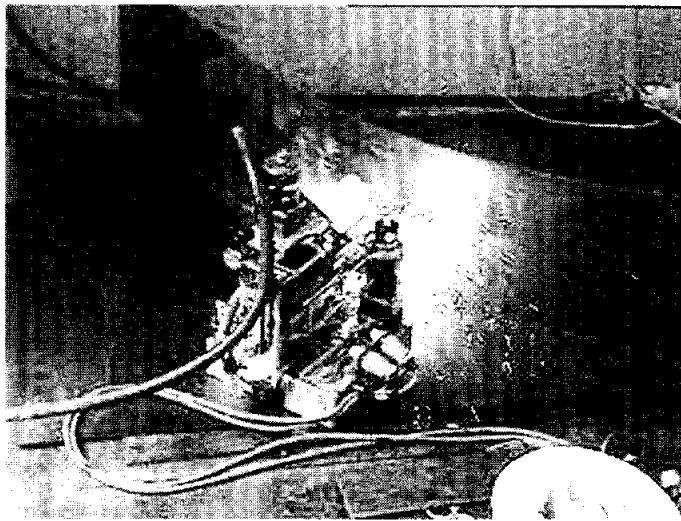


Photo 4.7 Welding scene of a welding mobile robot for smooth curved welding

Table 4.3 Welding condition

Items	Condition
Work piece	5t (mm)
Welding wire	Fixed cored wire
Welding current	240A
Welding voltage	24V
Sliding gas	CO ₂
Welding velocity	7.5mm/sec

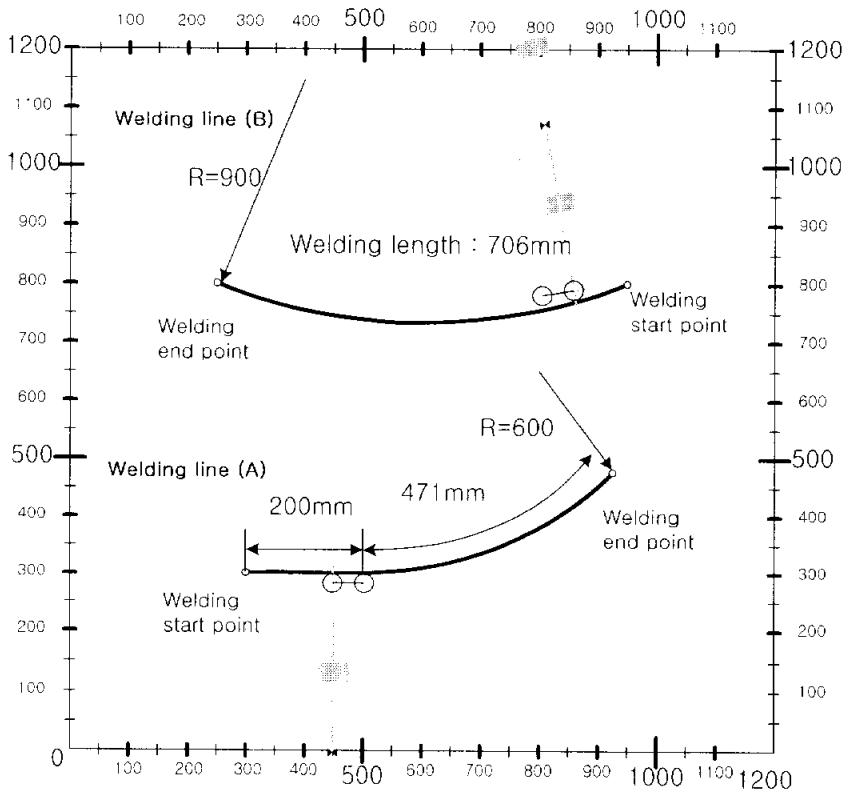


Fig. 4.20 Reference smooth welding line for welding experiment

목두께의 편차는 최대가 1.25mm이고, 평균 목두께는 4.5667mm이다. 또한 수평 각장의 최대 편차는 1.25mm이며, 평균 수평 각장은 6.5042mm이다. 수직 각장의 최대 편차 역시 1.25mm이며, 평균 수직 각장은 6.7083mm이다. 수직 각장이 수평 각장에 비해 약 0.2mm 큰 것을 볼 수 있지만, 필릿 용접에서 0.2mm 오차는 등각장의 범위에 들어간다.

결과적으로 자유곡선형 용접 이동로봇으로 곡선의 안쪽(용접선(A))을 용접 실험한 결과 용접 이동로봇은 안정적인 아크 분위기를 유지하면서 목표 용접 속도를 일정하게 제어하며, 용접 작업을 수행하였고, 또한 용접선을 정밀하게 추적하여 등각장의 용접 비드를 얻었다.

Photo 4.10은 용접선(B)를 용접한 후의 비드 외관을 나타낸 사진이다. Photo 4.11은 용접선(B)의 용접부 끝단 비드 외관을 나타낸 사진이다. Fig. 4.24는 용접선(B)를 용접한 후 측정된 비드의 목두께(throat depth)를 나타낸 것이다. Fig. 4.25는 수평 각장을 나타내고, Fig. 4.26은 수직 각장을 나타낸다.

목두께의 편차는 최대가 1.25mm이고, 평균 목두께는 4.525mm이다. 또한 수평 각장의 최대 편차는 1.5mm이며, 평균 수평 각장은 6.675mm이다. 수직 각장의 최대 편차 역시 1.5mm이며, 평균 수직 각장은 6.7083mm이다. 수직 각장이 수평 각장에 비해 약 0.028mm 큰 것을 볼 수 있다. 필릿 용접에서 0.028mm 수평 수직 각장 오차는 등각장으로 간주한다.

결과적으로 자유곡선형 용접 이동로봇으로 곡선의 바깥쪽(용접선(B))을 용접 실험한 결과 용접 이동로봇은 안정적인 아크 분위기를 유지하면서 목표 용접 속도를 일정하게 제어하며, 용접 작업을 수행하였고, 또한 용접선을 정밀하게 추적하여 등각장의 용접 비드를 얻었다.

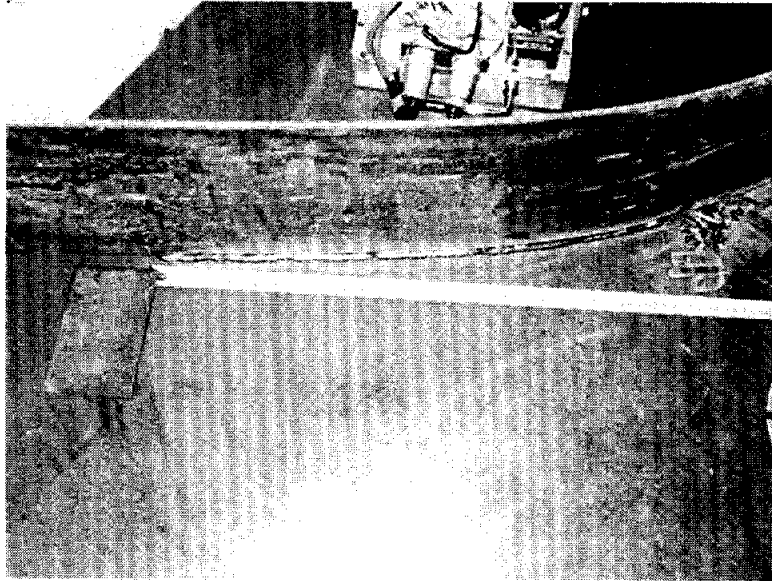
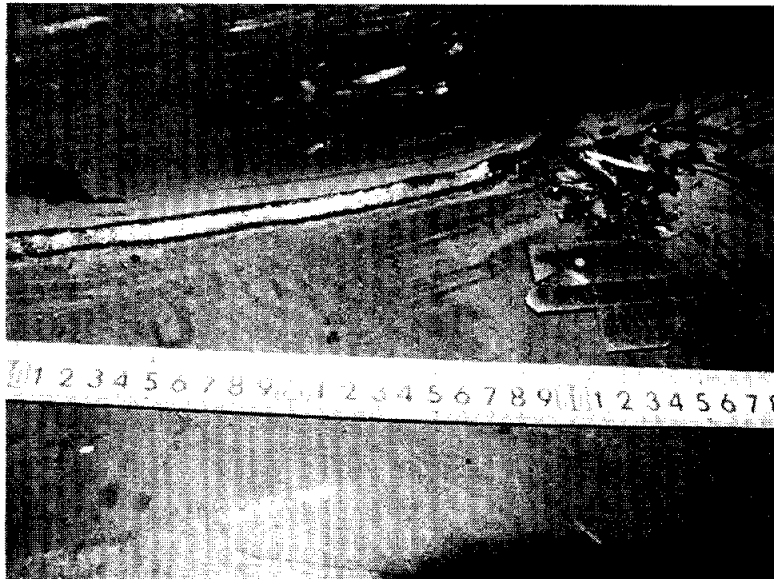


Photo. 4.8 Welding bead of a welding line (A)



*Photo. 4.9 Welding bead at end point
of a welding line (A)*

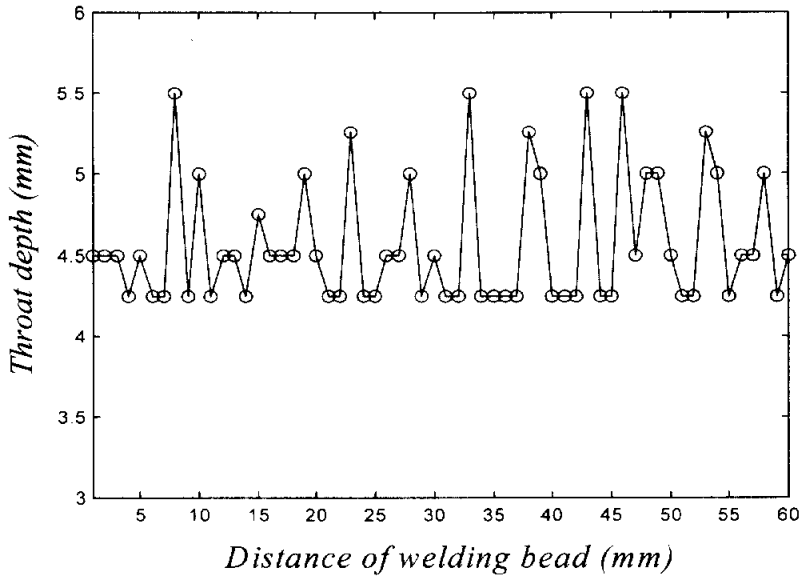


Fig. 4.21 Throat depth of welding line (A)

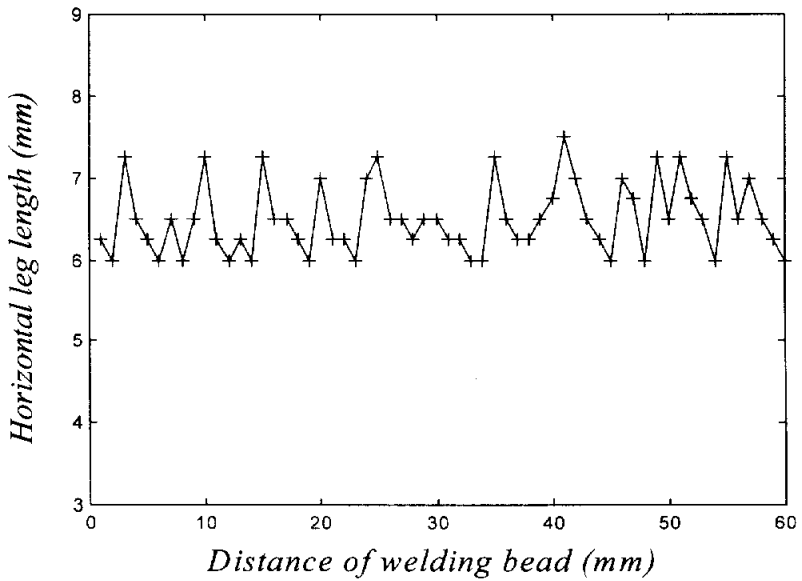


Fig. 4.22 Horizontal leg length of welding line (A)

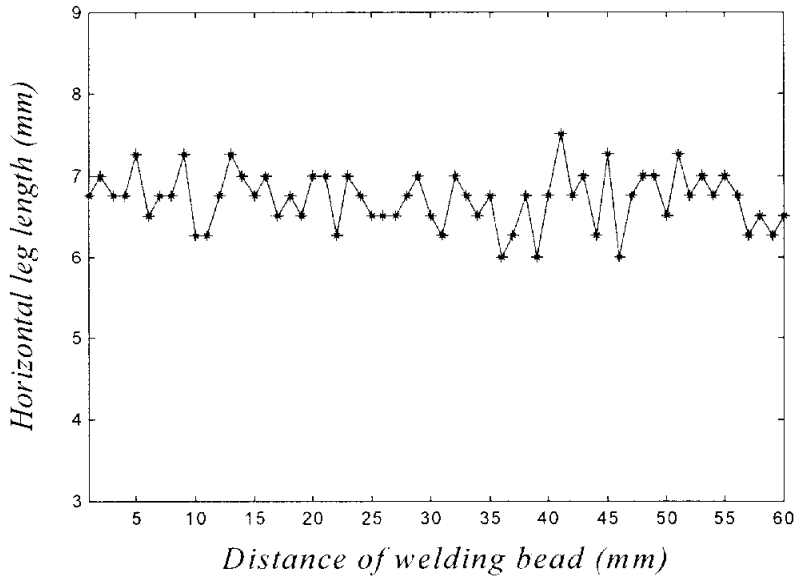


Fig. 4.23 Vertical leg length of welding line (A)

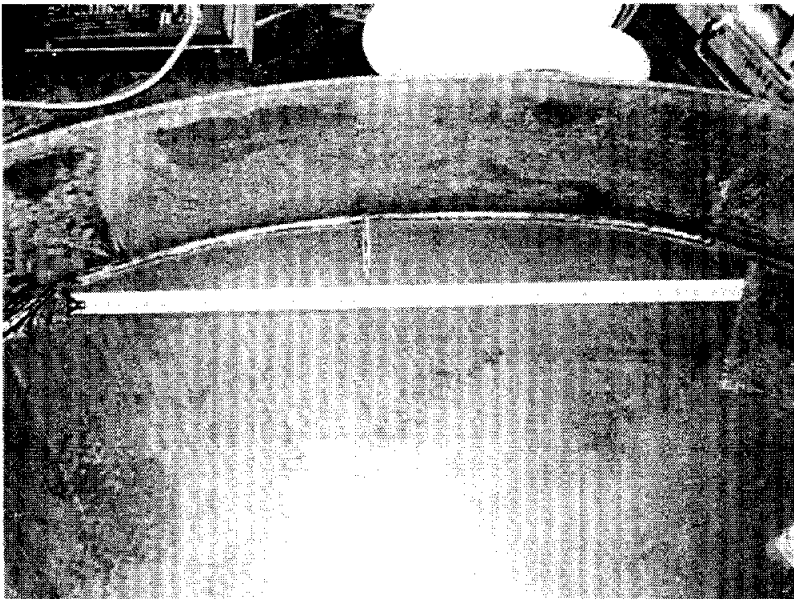


Photo. 4.10 Welding bead of a welding line (B)

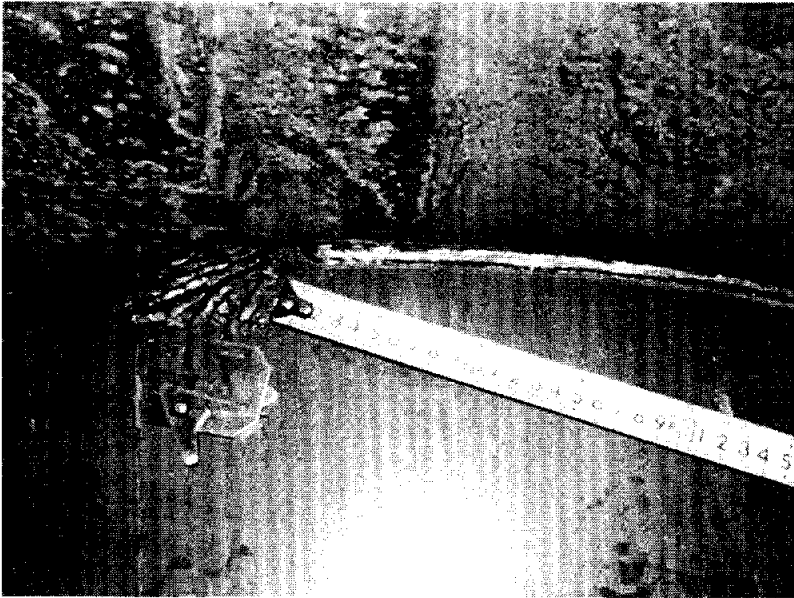


Photo. 4.11 Welding bead at end point of welding line(B)

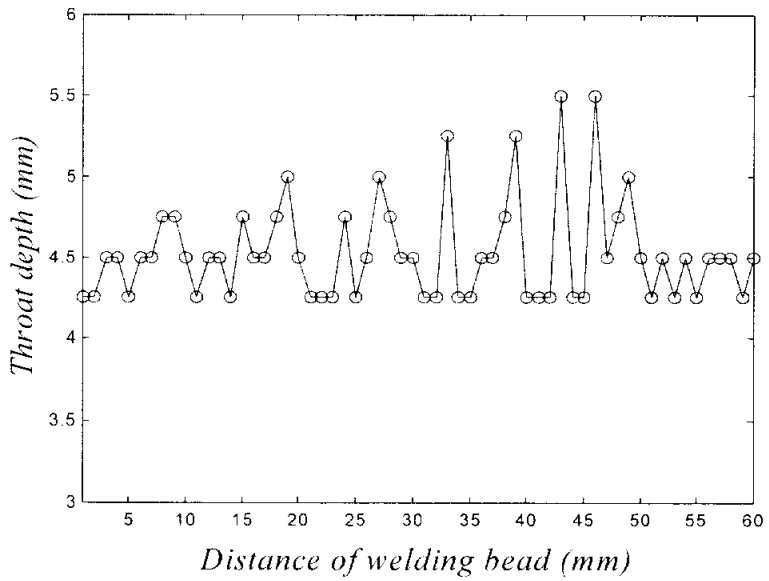


Fig. 4.24 Throat depth of welding line (B)

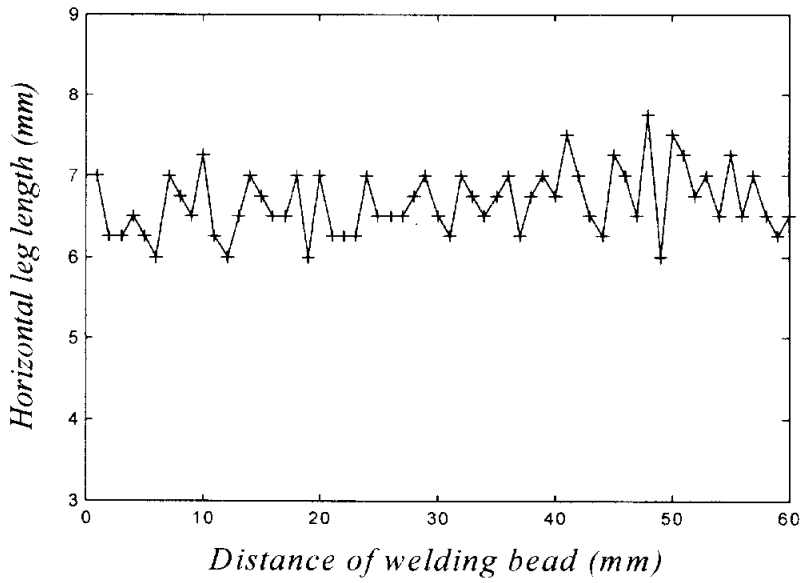


Fig. 4.25 Horizontal leg length of welding line (B)

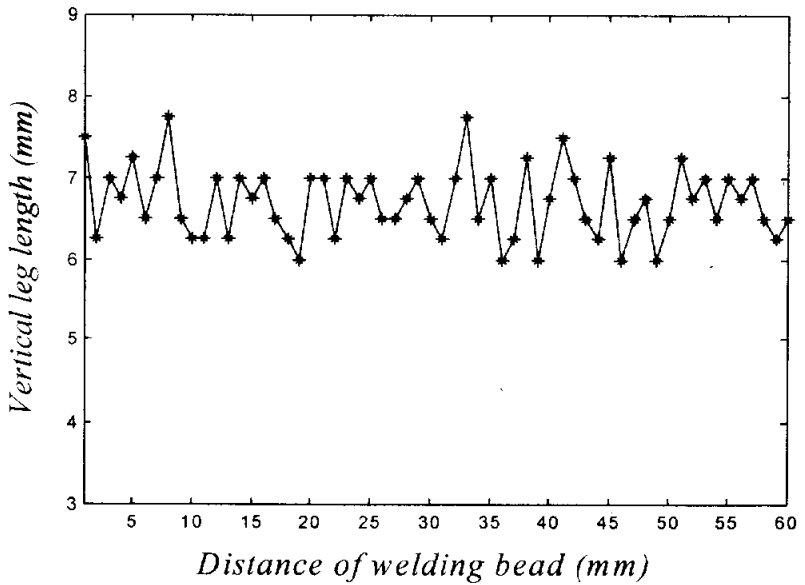


Fig. 4.26 Vertical leg length of welding line (B)

제 5 장

결 론

본 논문에서는 조선 공정 및 대형 철구조물 조립공정에서 숙련공의 인력에 의존하고 있는 격자의 모서리부 용접과 자유곡선 용접을 위한 용접 이동로봇을 센서의 형태에 따라 개별적으로 모델링하고 제어기를 설계하였다. 또한 실제 용접 공정에 적용할 수 있는 용접 이동로봇 및 용접선 추적 센서를 개발하여 용접 속도 제어 및 용접선 추적 제어를 행한 결과를 나타내었다.

격자형 용접의 자동화를 위해 격자의 직선부와 모서리부의 용접선을 연속적으로 추적할 수 있는 격자형 용접선 추적 센서를 개발하였고, 격자형 모재 공간을 자유롭게 이동하면서 격자의 직선부와 모서리부를 연속적으로 용접할 수 있는 이동로봇을 개발하였다. 격자형 이동로봇의 주행 제어와 용접선 추적 제어를 위해 제어기를 다음과 같이 3가지로 나누어 설계하였는데, 첫째는 PID 제어기법을 사용한 용접선 추적용 토치 슬라이더 제어기이고, 둘째는 PD 제어기법을 사용한 이동로봇의 직선 주행 제어기이며, 셋째는 PD 제어기법을 사용한 이동로봇의 선회 제어기이다. 또한 실제 용접 실험을 통해 우수한 용접 속도 제어 성능과 용접선 추적 성능을 얻었다.

자유곡선형 용접을 위해 자유곡선형 용접선 추적 센서를 고려하여 이동로봇을 모델링하였고, 비선형 제어기법인 backstepping법을 이용하여 제어기를 설계하였다. 설계된 제어기의 성능과 실제 용접 성능을 비교하기 위해 이동로봇을 개발하였고, 모의실험과 실제 용접 실험을 통하여 정밀한 용접속도 제어와 우수한 용접선 추적 성능을 얻었다.

본 논문에서 개발되어진 격자 및 자유곡선형 용접 이동로봇은 조선 분야와 대형의 철구조물 조립공정에서 그 활용이 크게 기대된다. 또한 용접선 추적 센서는 용접 이동로봇뿐만 아니라, 기타 여러 용접 자동화 분야에 많은 기여가 있을 것으로 판단된다.

추후 연구 과제로서는 용접 이동로봇이 용접뿐만 아니라 용접 중 품질 평가 및 진단까지 행할 수 있고 또한 이동로봇을 네트워크로 연결하여 용접 이동로봇 상호간에 작업을 협조, 보완하면서 자율적이고, 지능적으로 용접을 수행할 수 있는 용접 이동로봇의 개발이다.

참고문헌

- [1] B.O. Kam, Y.B. Jeon and S.B. Kim, "Motion Control of Two-Wheeled Welding Mobile Robot with Seam Tracking Sensor", 2001 IEEE International Symposium on Industrial Electronics Proceedings, Pusan, Korea, pp.851-856, 2001. 6
- [2] 김영식, "최신용접공학", 형설출판사,
- [3] Y.B. Jeon, B.O. Kam, S.S. Park and S.B. Kim, "Seam Tracking and Welding Speed Control of Mobile Robot for Lattice Type Welding", 2001 IEEE International Symposium on Industrial Electronics Proceedings, Pusan, Korea, pp.857-862, 2001. 6
- [4] 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 System Vol. 1, No. 1, pp. 35 - 42, March 2003.
- [5] Campion, G., Bastine, G. and dAndrea-Novel, B., 1996, "Structural Properties and Classification of Kinematic and Dynamic Models of Wheeled Mobile Robots", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 12, No. 1, pp. 47~62.
- [6] Yoshio Yamamoto : Control and Coordination of Locomotion and Manipulation of a Wheeled Mobile Manipulator University of Pennsylvania Philadelphia, PA USA 1994
- [7] J. H. Chung and D. H. Hong, "Comparative Study of Tracking Control for a Mobile Manipulator : Nonholonomic and Dynamic

- Cases”, KSME International Journal, pp. 585~595, 1999.
- [8] N. Sarkar, X. Yun, and V. Kumar (1994), Control of Mechanical Systems with Rolling Constraints, The international journal of robotics research, Vol.13, No.1, pp.55-69.
- [9] R. Fierro, F. L. Lewis (1995), Control of a Nonholonomic Mobile Robot, In proceedings of IEEE CDC, pp.3805-3810.
- [10] T. Fukao, H. Nakagawa, and N. Adachi (2000), Adaptive Tracking Control of a Nonholonomic Mobile Robot, Transactions on IEEE robotics and automation, Vol.16, No.5, pp.609-615.
- [11] Y.B. Jeon, S.B. Kim and S.S. Park, “Modeling and Motion Control of Mobile Robot for Lattice Type Welding”, KSME International Journal, Vol. 16, No. 1. pp. 83-93. 2002
- [12] A. Courcelle, O. Horn : Ultrasonic Data Representation : Application to Mobile Robots Localization. Proceeding of the 1998 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems Victoria, B.C., Canada October 1998
- [13] Koichi Hashimoto and Toshiro Noritsugu : Visual Servoing of Nonholonomic Cart. Proceeding of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation Albuquerque, New Mexico April 1997
- [14] Yi Ma, Jana Kosecka, Shankar Sastry : Vision Guided Navigation for A Nonholonomic Mobile Robot. Proceeding of the 36th Conference on Decision & Control San Diego, California USA December 1997
- [15] 이원기, 이근유, 오명석, 김상봉, “고속회전 아크센서를 이용한 필

- 렛 용접선 추적에 관한 연구”, 2003년도 춘계학술대회 강연 및 논문
집, 대한기계학회, pp917-922, 2003년 4월
- [16] 김철희, 나석주, “중공축 모터를 이용한 회전 아크에 관한 연구”
대한용접학회지 제18권 제5호, pp589~594, 2000년, 10월
- [17] 엄기원, 이세현, 김동철 “비전센서를 이용한 용접시스템의 모델링
및 제어”, 대한용접학회지 제14권, 제4호, pp7~15, 1996년 8월
- [18] Pierre Sicard, Martin D. Levine “Joint Recognition and Tracking
for Robotic Arc Welding” IEEE Transactions On System, Man,
and Cybernetics, Vol. 9, No. 4, July/August 1989 pp 714~728
- [19] Benigno Maqueira, Charles I. Umeagukwu and Jacek Jarzynski
“Application of Ultrasonic Sensors to Robotic Seam tracking”
IEEE Transactions On Robotics and Automation, Vol. 5, No. 3,
June 1989 pp 337~343
- [20] Charles Umeagukwu, Benigno Maqueira, and Russell Lambert
“Robotic Acoustic Seam Tracking : System Development and
Application” IEEE Transactions On Industrial Electronics. Vol.
36, No. 3, August 1989 pp 338~348
- [21] 신준호, 김재웅, “용접선 자동추적을 위한 이중 전자기센서의 개발
에 관한 연구” 대한용접학회지 제18권 제4호, pp 330~339, 2000년,
8월
- [22] 김진덕 “선체 대조립 공정을 위한 용접 이동로봇 시스템의 경로계
획과 제어에 관한 연구” 한국과학기술원 석사학위논문 1998년 12월
- [23] 감병오, 김동규, 김광주, 김상봉, “디지털식 연속/단속 용접용 캐
리지 개발”, 한국해양공학회지 제16권 제1호, pp.64-70, 2002(ISSN
1225-0767)[13] 감병오, 전양배, 강치정, 주갑영, 김상봉, “격자형

- 용접 주행로봇의 개발” , 2000년도 특별강연 및 추계학술발표대회
개요집, 대한용접학회, pp.34-36, 2000.10
- [24] 강치정, 전양배, 감병오, 신승화, 김상봉, “연단속 용접 주행로봇의
개발” , 2000년도 특별강연 및 추계 학술발표대회 개요집, 대한용접
학회, pp.31 33, 2000.10
- [25] 안철기, 이민철, 손권, 최재원, 정창욱, 김형식, “용접로봇의 작업교
시를 위한 모의실험의 개발” 한국정밀공학회 2000년도 춘계학술대
회논문집 pp 401 404
- [26] Krstic, M., Kanellakopoulos, I., and P., Nonlinear and adaptive
control design, (1995), New York, Wiley.
- [27] Yang, J.M. and Kim, J.H. , Sliding Mode Motion Control of
Nonholonomic Mobile Robot, Proceeding of IEEE ICRA, (1999), p.
15 23
- [28] Gonzalez, S.P., Aramada, M.A., and Jimenez, M.A. , Ship
Building eith Power, IEEE Robotics & Automation Magazine,
(2000), p. 35-43.
- [29] Lefeb, E., et al., Observer Based Kinematic Tracking King
Controlller for a Unicycle Mobile robot, Proceeding of IEEE
ICRA, (2001), p. 2084-2089.
- [30] T. C. Lee and et al. (2000), Tracking Control of
Unicycle Modeled Robots using a Saturation Feedback Controller,
Transactions on IEEE control system technology, Vol.9, No.2,
pp.305-318.

Publications and Conferences

A. Publications

1. Byoung-Oh Kam, Yang-Bae Jeon, Jin-Ho Suh, Myung-Suk Oh and Sang-Bong Kim, "Motion Control of Two-Wheeled Welding Mobile Robot with Seam Tracking Sensor", International Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol.4, No.2, pp30-38, 2003.03
2. 감병오, 김동규, 김광주, 김상봉, "디지털식 연속/단속 용접용 캐리지 개발", 한국해양공학회지 제16권 제1호, pp.64-70, 2002 (ISSN 1225-0767)
3. 감병오, 조상명, 김상봉, "단락시간비를 이용한 GMAW의 비드 높이 제어에 관한 연구", 한국해양공학회지 제16권 제2호, pp.53-59, 2002(ISSN 1225-0767)

B. Proceeding and Conference

1. Y.B. Jeon, B.O. Kam, S.S. Park and S.B. Kim, "Motion Control of Mobile Robot for Lattice Type Welding", ASIAR(Asian Symposium on Industrial Automation and Robotics) 2001, Bangkok, Thailand, pp.156-161, 2001. 5
2. B.O. Kam, Y.B. Jeon and S.B. Kim, "Motion Control of Two-Wheeled Welding Mobile Robot with Seam Tracking

- Sensor”, 2001 IEEE International Symposium on Industrial Electronics Proceedings, Pusan, Korea, pp.851-856, 2001. 6
3. Y.B. Jeon, B.O. Kam, S.S. Park and S.B. Kim, “Seam Tracking and Welding Speed Control of Mobile Robot for Lattice Type Welding”, 2001 IEEE International Symposium on Industrial Electronics Proceedings, Pusan, Korea, pp.857-862, 2001. 6
 4. Tan Lam Chung, Trong Hieu Bui, Byoung Oh Kam, Jin Ho Suh, and Sang Bong Kim. “Application of Tracking Control to Spot Bead Welding Mobile Robot Using Camera Sensor”, Asian symposium on Industrial Automation and Robotics, ASIAR 2003, Bangkok 2003. 5.
 5. Jin-Ho, Byoung-Oh Kam and Sang Bong Kim “Adaptive Motion Tracking Control of A Nonholonomic Two Wheeled Welding Mobile Robot”, Asian symposium on Industrial Automation and Robotics, ASIAR 2003, Bangkok 2003. 5.
 6. B.O. Kam, V.G. Nguyen, and S.B. Kim, “Motion Control of Two Wheeled Welding Mobile Robot”, Proceedings of the 8th Conference on Science and Technology, Control & Automation, pp.57-63, Vietnam National University, HCM City, April, 2002.
 7. 이근유, 강치정, 감병오, 김상봉, “ 마이크로프로세서를 이용한 연속/단속 용접 캐리지의 개발”, 한국정밀공학회 2000년도 춘계 학술대회논문집, pp. 405-408, 2000.5
 8. 강치정, 전양배, 감병오, 신승화, 김상봉, “연단속 용접 주행로봇의 개발”, 2000년도 특별강연 및 추계 학술발표대회 개요집, 대한용접학회, pp.31-33, 2000.10

9. 감병오, 전양배, 강치정, 주갑영, 김상봉, “격자형 용접 주행로봇의 개발”, 2000년도 특별강연 및 추계 학술발표대회 개요집, 대한용접학회, pp.34-36, 2000.10

감사의 글

본 논문이 완성되기까지 시종일관 지켜봐 주시고 지도해 주신 지도교수님이신 김상봉 교수님께 진심으로 머리 숙여 감사의 마음을 올립니다.

항상 부족함이 많은 저에게 학문과 인생을 가르쳐 주셨으며 어려울 때마다 격려와 질책을 아끼지 않으셨던 지도교수님께 다시 한번 더 진심으로 감사를 올립니다.

논문 심사 과정에서 따끔한 질책과 아울러 격려를 아끼지 않으셨던 주심 김환성 교수님, 부심 조상명 교수님, 장지성 교수님, 서진호 박사님께 감사의 마음을 올립니다. 그리고 본 논문이 완성되기까지 돌보아 주신 이명숙 교수님께도 머리 숙여 감사의 마음을 올립니다.

지금까지 항상 지켜봐 주시고 사랑으로 격려해 주신 국립 부경대학교 생산 가공공학과 김우열 교수님, 박홍일 교수님, 김성규 교수님, 조상명 교수님, 이병우 교수님, 서원찬 교수님, 방국수 교수님께 감사드립니다. 항상 건강하십시오. 동명대학 정해용 교수님, 김종철 교수님, 이학주 교수님, 최갑송 교수님, 창원기능대학 최수준 교수님, 양장홍 교수님, 윤한재 교수님, 유영형 교수님, 원종식 교수님, 오동수 교수님, 부산기능대학 최윤식 교수님, 이종환 교수님, 이성용 교수님, 류창환 교수님, 박창규 교수님, 한규상 교수님, 서상하 교수님, 이정식 교수님, 김수욱 교수님께 감사드립니다.

실무 경험에 많은 도움을 주신 조흥전기산업주식회사 최백규 대표이사님, (주)중해 홍대인 회장님, 성정민 대표이사님, (주)한국엔지니어링 장택식 대표이사님, 한진중공업 최우현 팀장님께 감사드립니다.

모든 생활에 항상 힘과 용기가 되어 주신 CIMEC 연구실 선배님이신 신민생 교수님, 안휘웅 교수님, 김학경 선생님, 이진우 선생님, 이종환 교수님, 김인규 선배님, 정남수 선배님, 박순실 선배님, 이성호 선배님, 배경수 선배님, 지명석 선배님, 강호원 선배님, 김성민 선배님, 유휘룡 선배님, 전봉환 선배님, 오정환 선배님, 박진선 선배님, 김재윤 선배님, 김진호 선배님, 한정만 선배님

항상 선배님의 사랑을 기억하겠습니다. 학위과정을 마치고 베트남으로 귀국한 쿠엔반 째 선생님, 쿠엔반 띨 선생님께도 감사의 마음을 멀리서나마 올립니다.

CIMEC 연구실로 유학오신 Phuc 선생님, Tung 선생님, 허철 선생님, Hieu 님, Dung님, Kim님, Lam님에게 감사를 드립니다.

CIMEC 연구실 후배 강병철님, 박준형님, 이근유님, 여태경님, 전양배님, 강치정님, 박성재님, 김석렬님, 신승목님, 김정민님, 김성욱님, 이종희님, 전신희님, 광민규님, 김정훈님, 김지년님, 임재성님, 김정기님, 김해영님, 이학철님, 정준호님, 배상현님, 김현중님, 김대원님, 마성진님, 김상찬님, 김영규님께 감사드립니다. 부경대학교 생산가공공학과 후배님들과 창원기능대학 메카트로닉스과 학우들에게 감사드립니다.

저를 낳으시고 지금까지 키워주신 아버님, 어머님의 그 큰 은혜에 감사드립니다. 또한 저에게 언제나 힘이 되어주신 형님, 자형, 누님 정말 감사합니다. 그리고 저를 위해 항상 기도하시는 당숙님, 당숙모님, 김종석님, 그 외 모든 가족에게 이 글로나마 감사의 마음을 전합니다. 그 밖에도 저를 항상 도와주셨던 여러분들에게 이 지면으로나마 감사의 마음을 올리며, 행복하시길 기도합니다.

부경대학교 대학원

2003년, 7월 15일

감 병 오