

조선소의 대형블록 용접을 위한 인력 운반형 용접로봇 개발

Development of a Portable Welding Robot for Welding Jobs in Ship Blocks

박 주 이*, 김 진 욱, 김 정 민, 김 지 윤, 김 웅 지, 김 수 호
(Juyi Park^{1,*}, Jin-Wook Kim¹, Jung-Min Kim¹, Ji-Yoon Kim¹, Woongji Kim¹, and Soo-Ho Kim¹)

¹Mechanical & Electric R&D Institute, Daewoo Shipbuilding and Marine Engineering Co. Ltd.

Abstract: This paper represents a portable robot for use in the welding process of the double hulls in shipbuilding yards. It has 5 degrees of freedom and 3kg of payload. Its body weight is 17.3 [kg] so that human workers can carry it by hand to the work place. Its body is mainly made of magnesium and aluminum alloys. Since the robot is placed about 25m apart from its controller, EtherCAT is adopted for reliable connection between the robot and controller through a single light cable. RTX real-time kernel and KPA EtherCAT master are used to control the robot on a Windows XP environment. The performance of the developed robot is satisfactory to the requirement in welding tasks of U-type cells in shipbuilding yards.

Keywords: portable welding robot, shipbuilding, EtherCAT, double hull

I. 서론

조선 자동화를 이루기 위하여 여러 가지 어려움이 있지만, 그 중에서 무거운 자동화 기기의 운반에 대한 어려움이 가장 자주 거론되는 문제중의 하나이다. 조선소에서는 작업물이 상대적으로 거대하여 자동화된 생산라인에 작업물이 지나가는 형태로는 자동화가 어려우므로, 자동화 기기를 작업물에 가까이 운반 후 작업을 해야 하는 경우가 대부분이다. 작업장에는 맨홀과 펜스 등의 장애물이 많고 복잡하기 때문에, 크레인 등의 이동장비를 사용하기는 어렵고 작업자가 장비를 수동 운반해야 하는 경우도 많다. 또한, 이러한 작업 환경에서는 제어 및 전원을 위해 필요한 케이블이 길기 때문에, 케이블을 옮기는 것과 효과적으로 정리하는 것도 큰 문제가 되고 있다.

이러한 작업 환경에서 성공적으로 적용되는 장비중의 하나가 휴대용 용접 캐리지는이다. 용접캐리지는 작고 가벼울 뿐만 아니라, 단순 작업에 효율적이기 때문에 널리 사용되고 있다. 그러나, 캐리지는 오직 한 가지 종류의 작업만을 수행할 수 있기 때문에 약간 복잡한 작업에는 두 종류의 캐리지를 번갈아 사용해야 하는 단점이 있다. 예를 들어, 대표적인 조선 작업물 중 수평 직선 용접과 수직 위빙 용접 작업으로 구성되어있는 U자 형태의 용접 작업에서는 하나의 캐리지는로는 작업을 수행 할 수 없고, 수평 직선 용접용 캐리지와 수직 위빙 용접용 캐리지를 사용하여야 작업이 가능하다. 이 경우, 각각의 캐리지는는 작업에 선행되는 준비가 필요하기 때문에 작업의 종류와 복잡성에 따라 준비시간이 증가하게 된다.

게다가, 대부분의 용접 캐리지는는 용접 토치의 작업 각도를 제어할 수 없어 용접 시작과 종료 지점의 100mm에 해당하는 부분을 용접할 수 없으므로 이 부분은 작업자가 수동으로 용접을 해 주어야 한다.

따라서 본 연구에서는 종래의 캐리지가 갖는 장점은 최대한 살리면서 단점을 보완할 수 있는 개념의 로봇이 개발되었다. 즉, 캐리지처럼 작업장에 사람이 들고 들어갈 수 있을 정도로 가벼우면서도, 기존의 캐리지가 하지 못했던 다양한 용접 작업을 수행할 수 있는 로봇이 개발되었다[1-3]. 이 로봇은 작업장에 한 번 세팅을 하면 수평, 수직, 위빙, 돌림 용접 등 모든 작업을 수행하므로, 작업을 수월하게 해 준다. 뿐만 아니라 모든 구간을 부드럽게 이어 용접하므로 용접이음부가 발생하지 않아 최상의 용접품질을 얻을 수 있다.

본 연구에서는 로봇의 무게를 작업자가 수동으로 운반할 수 있도록 로봇을 최대한 경량화하기 위하여 마그네슘 합금을 주 소재로 하여 로봇 본체를 제작하였다. 일부 고 강성이 요구되는 주요한 구동부에는 알루미늄 합금, 철, 티타늄을 적절히 혼용하여 제작하였다.

로봇 제어에는 EtherCAT [4]을 적용하였다. 제어기와 로봇은 25~50m 정도 떨어져 있으므로 이 거리에서 안정성과 실시간성이 확보되어야 한다. 또한, 이 정도 길이의 케이블은 운반이나 설치에 방해가 되지 않도록 최대한 가볍고 가는 것이 필요하다. 그러므로, 필드버스 방식을 모색하였으며, 그 중에서도 이미 널리 산업 자동화에 적용되어 성능이 검증된 EtherCAT을 사용하였다[5,6].

로봇 제어 프로그램은 윈도우XP에 RTX [7]를 올린 RTOS 환경에서 구동되며, EtherCAT 통신을 위해 필요한 EtherCAT 마스터[8]는 Konieg사의 KPA를 사용하였다. 개발된 로봇은 조선소의 블록 제작 공장에서 U자 형태의 용접 작업에 적용되었다. 작업자는 로봇에 부착된 라인 레이저를 사용하여 로봇을 작업물에 맞게 위치시키고, 작업물의 종류와 크기정보를 입력하는 것으로 작업을 시작한다. 로봇은 입력된 정보에 따라

* Corresponding Author

Manuscript received December 20, 2013 / revised May 8, 2014 / accepted May 13, 2014

박주이, 김진욱, 김정민, 김지윤, 김웅지, 김수호: 대우조선해양(주)
(juyipark@dsme.co.kr/antioch2@dsme.co.kr/jmin209@dsme.co.kr/jonathan@dsme.co.kr/wj@dsme.co.kr/shkim2@dsme.co.kr)

※ 본 논문은 2013년 ICROS 대전총정기부 학술대회에서 초안이 발표되었음.

OLP (Offline Program)을 사용하여 작업 파일을 자동으로 생성한다. 작업이 시작되면, 로봇은 터치 센서를 통하여 작업물의 위치와 방향 등의 정보를 측정하고, 생성된 작업 파일에 따라 용접 작업을 수행한다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 휴대용 용접 로봇의 개발 전략과 요구사항을, III 장에서는 로봇 및 제어기의 하드웨어 구조와 개발 세부 사항을 기술한다. IV 장에서는 제어소프트웨어 구성과 역기구학에 대해서 설명하고, V 장에서 응용의 예와 그 결과를 나타내었다. VI 장에서는 결론과 추후과제에 대해서 논의하였다.

II. 요구사항 및 개발전략

1. 요구사항

개발된 로봇 본체는 작업자가 조선 블록 내부의 맨홀이나 크로스 바를 넘어 운반할 수 있을 만큼 가벼워야 하며, 목표 중량은 산업 안전에 따라 작업자가 수동 운반 할 수 있는 하중인 20kg 이내로 한다. 로봇의 목표 가반하중은 3kg으로 한다. 이는 용접 토치와 케이블은 1.5kg이고 각종 센서 등을 고려할 때 필요한 로봇의 최소 가반하중이다.

작업 분석을 통하여 요구되는 작업 공간의 폭은 900mm이고, 높이는 800mm이며, 로봇과 작업물간의 거리는 600mm이다.

안전을 고려하여 각 축에는 모터와 일체화된 전자식 브레이크가 사용되어야 하며, 현장에서 로봇을 준비하는 시간을 최소화하기 위하여 절대 엔코더가 장착되어야 한다. 요구사항은 표 1에 정리하였다.

2. 개발 전략

경량화를 위하여 알루미늄보다 가벼운 마그네슘 합금을 로봇의 주 소재로 사용하였다. 고 강성이 요구되는 구동부에는 부득이 알루미늄이나 철을 사용하였지만, 그 외 대부분의 부품은 마그네슘 합금으로 제작되었다.

EtherCAT 필드버스는 로봇 본체와 제어기는 20~50m 가량 떨어져 케이블로 연결되어야 한다는 사양과 연결케이블의 경량화를 위해 채택되었다. EtherCAT 연결방식은 데이터-체인 방식으로써 오직 하나의 케이블로 로봇 본체 내부의 디수 서보 드라이브의 제어가 가능하므로, 간단한 하드웨어 구성을 가능하게 해준다. EtherCAT은 많은 산업 자동화의 응용 분야에 적용되어 그 안정성과 성능을 검증 받았으므로, 휴대용 용접로봇에 적절한 방식으로 선정되었다.

로봇의 자유도는 사용될 용접작업에서의 용접자세를 분석한 결과 5자유도이면 충분하다는 결론을 얻었다. 이론적으로, 용접을 위해 토치는 x, y, z 세 방향과 수평면과의 각도, 수직

표 1. 휴대용 용접로봇의 사양.

Table 1. Specification of portable welding robot.

항목	사양
로봇 본체 중량	17.3kg
가반 하중	3kg
최대 작업 반경	748.6mm
위치 반복 정밀도	+/- 0.1mm
자유도	5
위치 센서	절대 엔코더
구동기	AC서보모터

면에서의 각도만 유지되면 용접작업을 수행할 수 있으므로 5자유도 로봇이면 충분하다. 그러나, 5자유도 로봇은 움직일 때 토치가 길이 방향으로 기구학적인 구속에 따라 변화하여 용접 품질을 저하시킬 우려가 있으므로, 통상적으로는 6자유도 로봇을 선호한다. 즉, 로봇제어기가 토치의 TCP 정보를 정확히 알고 있지 못할 때, 제어기는 TCP가 일직선으로 주행하도록 로봇을 제어하나 TCP는 토치의 회전에 의해 변하게 되어 용접라인에 골목이 발생하게 된다. 그러나, 본 과제에서는 로봇의 무게를 줄이는 것이 중요하므로 5자유도로봇을 선택하였고, TCP정보를 주기적으로 정확하게 캘리브레이션하도록 하여 용접 품질을 보장하도록 하였다.

III. 개발 세부사항

1. 로봇 본체

로봇의 주 소재인 마그네슘 합금, AZ31[9]의 밀도는 1,700 kg/m³이고, 이는 2,700kg/m³인 알루미늄 합금보다 가볍다. 강성 등 다른 물성치는 표 2에 있는데, 이 표에서 볼 수 있는 바와 같이 마그네슘 합금은 알루미늄 합금보다 강성이 낮기 때문에 강성이 요구되는 부분에는 알루미늄 합금이 적용되었다.

AC 서보 모터로는 절대 엔코더를 갖춘Tamagawa의 AC서보모터 4601, 4602와 4603이 사용되었다. 1축과 4축을 제외한 2축, 3축과 5축에는 전자식브레이크가 적용되었다. 정격 출력은 각각 30W, 50W와 100W이다. 감속기로는 하모닉 드라이브와 타이밍 벨트를 사용되었으며, 감속비는 각 축 별로 1/120, 1/392, 1/272, 1/100, 1/100이다.

표 2. 휴대용 용접로봇의 사양.

Table 2. Specification of portable welding robot.

항목	단위	마그네슘 합금, AZ31	알루미늄 합금, 6061
인장 강도	MPa	255	310
항복 강도	MPa	200	276
연신율	%	12	12
탄성 계수	GPa	45	68.3
경도	HB	49	95

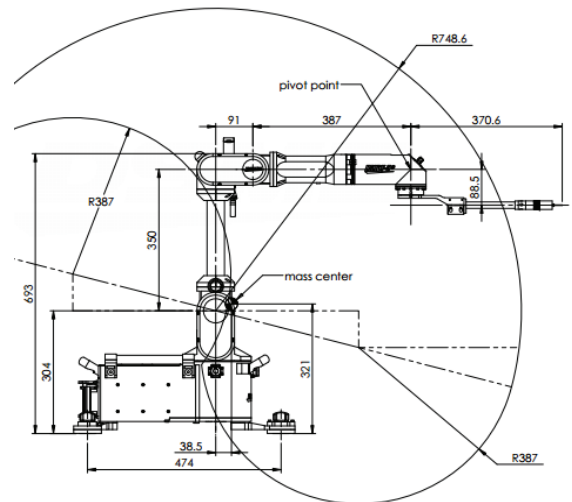


그림 1. 개발된 로봇의 작업 영역 및 주요 치수.

Fig. 1. Workspace and dimension of the developed robot.

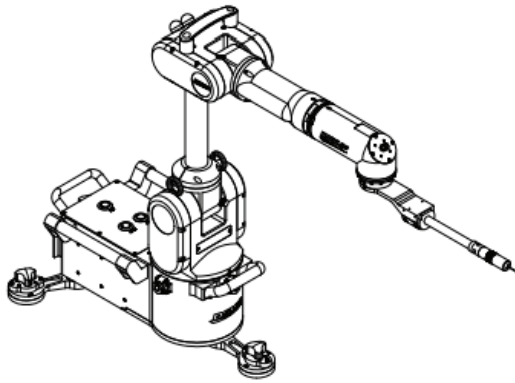


그림 2. 개발된 로봇의 외형.
Fig. 2. Body of the developed robot.

그림 1과 그림 2는 개발된 로봇의 작업 영역 및 주요 치수를 보여준다. 각 링크의 길이는 작업 영역을 고려하여 설계되었으며, Robcad를 통하여 검증되었다. 하단에 위치한 3개의 자석 스위치는 로봇 본체를 작업 중에 고정시키고, 손잡이를 통하여 로봇을 운반할 수 있다.

제작된 로봇 본체의 중량은 17.3kg이며, 이는 산업 안전기준의 작업자의 최대 수동 운반 중량 20 kg 이므로, 산업현장에서 문제없이 사용될 수 있다.

2. 로봇 제어 하드웨어

로봇 본체는 블록 내부에 위치하며 제어기는 조선 블록 외부에 위치하도록 설계하였다. 케이블 핸들링의 편의성을 위해 로봇과 제어기는 하나의 케이블로 연결되었는데, 이 케이블은 전원, 통신, I/O를 모두 포함할 수 있도록 특수 제작되었다. 이 통합케이블을 통하여 전원으로 24V, 20A의 직류와 12V, 5A 직류를 제어기로부터 공급받는다. 또한, 이 케이블에 로봇과 제어기의 통신 및 제어기와 교시조작기의 통신을 위해 STP line이 포함되며, 비상 정지 스위치와 전원 제어 스위치를 위한 I/O라인이 포함된다. 그림 3은 로봇 용접시스템의

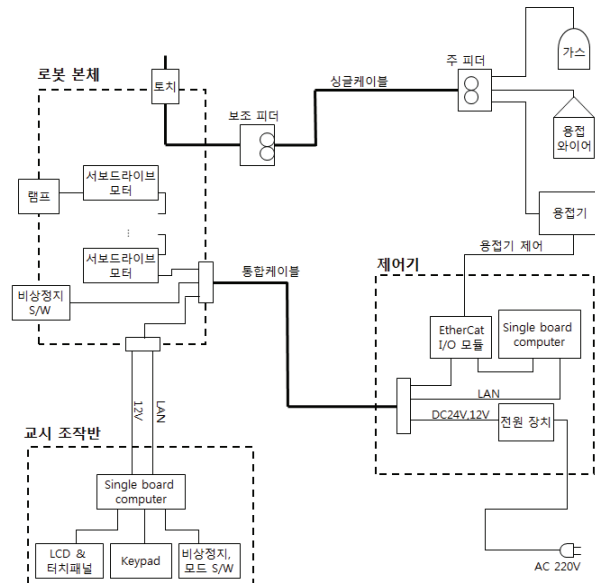


그림 3. 용접로봇시스템 하드웨어 배치 및 결선 관계도.
Fig. 3. Hardware diagram of welding robot system.

하드웨어 연결관계를 보여주고 표 3은 제어기 내부의 하드웨어와 그 사양을 보여준다.

서보 드라이브는 Copley Control사의 AEM [10]이 적용되었다. 이는 AC 서보 모터의 제어를 COE (CANopen over EtherCAT)로 통신하여 제어하고 SSI, EnDat와 Absolute A의 절대 엔코더의 피드백을 받는다.

제어기에는 두 종류의 I/O가 사용된다. 하나는 EtherCAT I/O 모듈을 사용하여 비상 정지 스위치와 용접기와와의 인터페이스를 하고, 다른 하나는 서보 드라이브의 I/O 모듈을 통하여 브레이크 상태 표시등과 센서의 입, 출력을 위하여 사용된다.

3. 로봇 교시기

로봇 교시기는 XP가 구동되는 휴대형 PC에 구현되었다. 교시기의 하드웨어 사양은 표 4에 나타내었다. CPU 보드는 상용품을 적용하였고, 키패드 인터페이스를 위해 PIC16F877이 사용되었다. 그림 4는 교시기의 하드웨어 구성을 나타낸 블록도이며 그림 5는 교시기의 GUI의 캡처화면이다.

표 3. 휴대용 용접 로봇 제어기의 사양.

Table 3. Specification of robot controller.

항목	사양
싱글 보드 컴퓨터	Intel Core 2 Duo E5400
네트워크 인터페이스 카드	Intel Pro100
전원 공급 장치	Motor & Servo Drive : 24V, 1500W TP : 12V, 60W ATX : 12V, 400W
I/O 모듈	EtherCAT Bus Coupler DIN 8ch, NPN Type DOOUT 8ch, NPN Type AIN 2ch, +/- 10V AOUT 2ch, +/- 10V

표 4. 로봇 교시기의 사양.

Table 4. Specification of teaching pendant.

항목	사양
프로세서	Intel Atom N270 1.6GHz
메모리	DDR II 1G
저장 장치	CF Type II 16G
디스플레이	7" wide WVGA Touch Screen
키패드	24 Key, Metal-Dom Switch
스위치	E-Stop, Mode, Enabling
전원	DC 12V, 23W
배터리	Lithium Polymer, 1000mAh
운영 체제	Windows XP

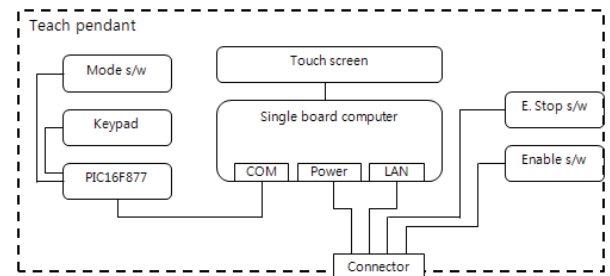


그림 4. 교시기의 하드웨어 블록도.
Fig. 4. Block diagram of teaching pendant.

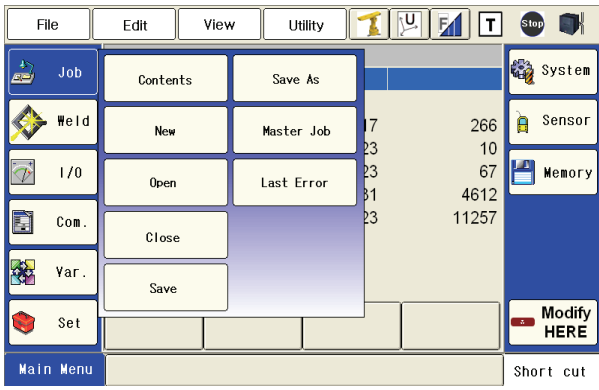


그림 5. 교시기의 GUI 화면.
Fig. 5. GUI screen of teach pendant.

IV. 로봇의 제어

1. 로봇 제어 소프트웨어

제어 프로그램은 윈도우XP에 RTX를 올린 RTOS 환경에서 구동되며, EtherCAT 마스터는 Konieg사의 제품을 적용하였다. 제어 프로그램은 그림 6과 같이 3개의 프로세스로 구성되어 있다. 프로세스간 통신은 공유 메모리와 메시지 패싱(passing)을 사용하며, 동기화된 데이터 전송을 한다. 로봇 제어의 중요한 부분인 실시간성 보장을 위하여 Task Executer와 Servo는 RTX 프로세스로 동작한다. Servo 프로세스에서 모션 제어 쓰레드는 1ms 주기로 동작하고 모션 제어 명령을 EtherCAT을 통하여 서보 드라이브로 보낸다. 또한, 이는 1ms 주기로 동기화된 메시지를 I/O 쓰레드로 보내며, I/O 쓰레드는 16ms 주기로 Task Executer의 Interpolation 쓰레드로 동기화된 메시지를 보낸다. 서보 드라이브에서 제어기로부터 받은 위치 제어 명령은 CAN의 통신규약인 CSP (Cyclic Synchronous Position) 모드로 처리된다. CSP모드는 서보 드라이브로 위치 제어 명령이 바로 전송되므로, CAN의 다른 방식(예. IP모드)에 비해 월등한 성능을 보여주기 때문에 CSP모드가 적용되었다. 그림 7은 CSP모드의 블록선도다.

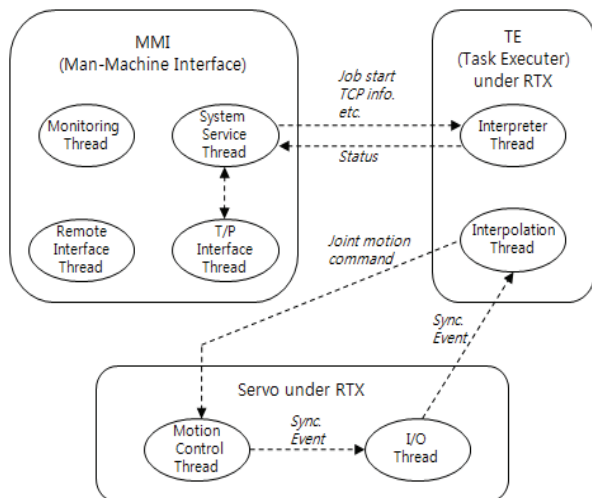


그림 6. 제어 프로그램의 프로세스와 쓰레드.
Fig. 6. Software modules in control program.

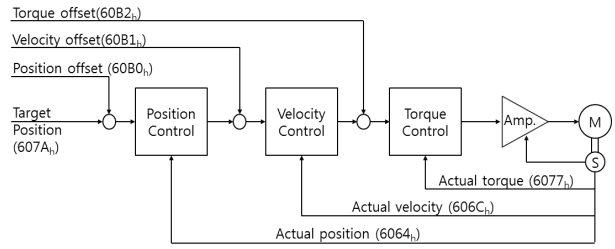


그림 7. CSP (Cyclic Synchronous Position) 모드의 블록도.
Fig. 7. Block diagram of CSP mode.

2. 역기구학

개발된 로봇은 그림 8과 같이 5축을 갖고 있어 주어진 위치와 자세를 모두 다 만족 시킬 수 없다[11]. 따라서, 주어진 자세 중 토치방향에 대한 회전성분은 무시하여 역기구학을 계산하도록 알고리즘을 개발하였다[1]. 즉, TCP의 위치와 자세 성분 중 토치의 수평각, 수직각은 정확히 구현하되, 토치 자체의 회전은 기구학적인 구축에 의해 결정되도록 하였다. 한편, 본 로봇의 손목부는 offset을 갖고 있으므로, 전통적인 방법으로는 역기구학 해를 구하는 것이 매우 어려우며 반복적인 방법으로 구하여야 한다. 반복적인 방법에 의한 역기구학 알고리즘을 정리하면 아래와 같다.

- ① TCP의 위치와 방향(수평 및 수직)은 주어진 값으로 고정된 상태에서 Tool의 회전각은 임의로 추정한다.
- ② 위의 추정치를 사용하여 역기구학을 풀어 관절값을 계산한다.
- ③ 계산된 관절 값을 사용하여 기구학을 풀어 그때의 TCP 위치를 계산한다.
- ④ 위에서 계산한 위치와 원하는 TCP 위치와의 차이를 계산한다.
- ⑤ 이 차이가 허용오차 보다 작으면, ②에서 구한 관절값을 역기구학의 해로 사용한다.
- ⑥ 차이가 허용오차보다 크면, tool 회전각의 추정치를 수정하여 ②단계부터 다시 시작한다.

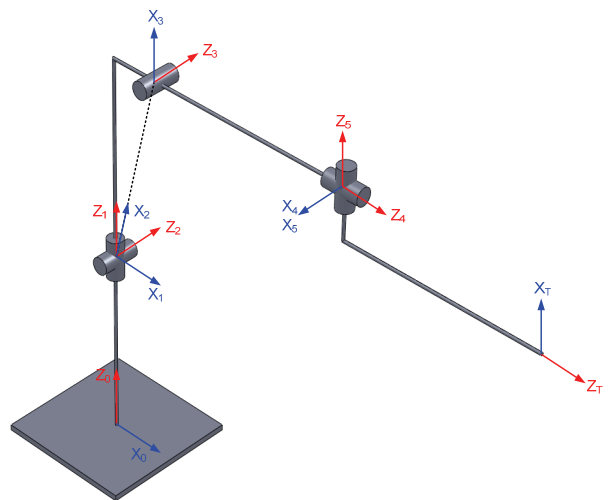


그림 8. 개발된 5축 로봇의 좌표계 정의.
Fig. 8. Frames defined in the developed 5 axis robot.

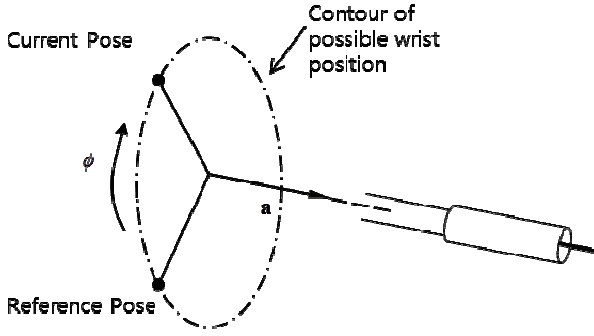


그림 9. 토치 방향이 정해졌을 때 가능한 토치의 회전, ϕ .
 Fig. 9. Possible wrist position and definition of ϕ .

Tool의 회전각은 그림 9와 같이 표현할 수 있다. 토치의 끝점 위치와 방향이 고정된 상태에서 토치의 회전할 수 있는 경로는 그림 9와 같은 원이 된다. 초기의 추정치를 기준으로 하여 그 이후의 추정치는 ϕ 로 정의하였다.

토치 회전방향의 초기추정치는 임의로 선정하면 되는데, 본 연구에서는 OLP에서 요구하는 회전행렬의 값을 사용하였다. 초기에 OLP에서 원하는 회전행렬을 R_0 라 할 때, 이는 아래와 같이 풀어 쓸 수 있다.

$$R_0 = [n_0 \quad o_0 \quad a_0] \quad (1)$$

그런데, 위에서 설명한 바와 같이 5축 로봇을 사용하여 토치의 수평 및 수직 방향만을 만족시키려 하므로, 위 R_0 의 행 벡터 중 a_0 만을 정확히 구현되고, n_0 와 o_0 는 기구학적인 구속에 의해 결정된다.

위의 역기구학 알고리즘에서 k 번째 반복의 결과로 얻어진 회전 행렬을 R_k 라 하면, R_0 와 R_k 는 아래의 관계를 갖게 된다.

$$R_k = R_0 \begin{bmatrix} c_{\phi_k} & -s_{\phi_k} & 0 \\ s_{\phi_k} & c_{\phi_k} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

따라서 R_k 가 주어지면 ϕ_k 는 아래와 같이 계산된다.

$$\phi_k = \text{atan2}(s_{\phi_k}, c_{\phi_k}), \quad (3)$$

여기에서

$$s_{\phi_k} = R_0(1,2)R_k(1,1) + R_0(2,2)R_k(2,1) + R_0(3,2)R_k(3,1)$$

$$c_{\phi_k} = R_0(1,1)R_k(1,1) + R_0(2,1)R_k(2,1) + R_0(3,1)R_k(3,1)$$

이고, $R(i, j)$ 는 R 의 i 행 j 열 요소를 의미한다.

역기구학 단계 ④에서의 TCP오차는 그림 10과 같이 벡터의 형태로 정의되며, k 번째 반복시 다음 단계의 ϕ_{k+1} 를 아래의 식에 의해 구한다.

$$\phi_{k+1} = \frac{e_{k-1}}{e_{k-1} - \text{sign}(\mathbf{E}_k \cdot \mathbf{E}_{k-1})e_k} (\phi_k - \phi_{k-1}) + \phi_{k-1} \quad (4)$$

여기에서 $e = |\mathbf{E}|$,

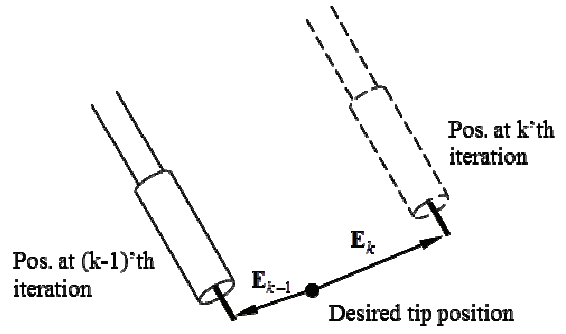


그림 10. TCP오차 벡터의 정의.
 Fig. 10. Definition of the TCP error vector.

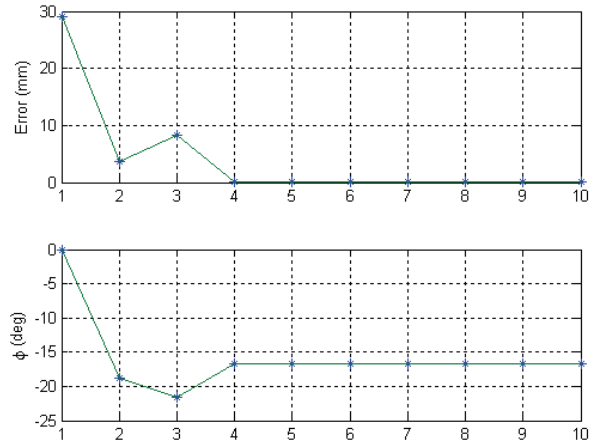


그림 11. 반복법에 의한 역기구학의 시뮬레이션 결과.
 Fig. 11. Simulation results of the iterative inverse kinematics.

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ -1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

이다.

위의 알고리즘을 시뮬레이션으로 검증한 결과, 초기에러를 매우 큰 경우에도 $k > 4$ 이면 TCP 오차의 크기가 0.01mm 이내로 수렴하는 것을 볼 수 있었으며, 로봇의 현 위치와 다음 모션의 차이가 수mm인 경우에는 $k = 2$ 에서 0.01mm 이내로 수렴하였다. 또한, 예상한 바와 같이 직선으로 토치의 방향을 유지하면 용접작업을 수행할 때, 토치가 기구학적인 구속으로 인하여 회전하였다. 그러나, 용접의 품질에는 거의 영향을 미치지 아니하였으므로, 직선용접이나 위빙용접에 문제없이 사용할 수 있었다.

V. 적용 예

로봇을 적용한 작업물은 그림 12와 같이 수평 직선 용접부와 수직 위빙 용접부로 구성되어 있다. 이러한 구조의 작업물은 편이상 U-cell이라 불리는데, 조선소에는 론지 사이의 용접할 부위에는 U-cell이 형성되는 물량이 대단히 많다.

로봇의 작업프로그램은 작업자의 티칭 과정이 필요 없도록 OLP (Off-Line Programming)으로 자동 생성된다. OLP는 U-cell의 다양한 형태와 크기에 따라 작업이 가능하도록 개발이 되었다. U-cell의 형태는 scallop hole과 collar plate의 위치에 따라 결정이 된다. 작업자가 한번 OLP의 UI로부터 형태를 설정하고

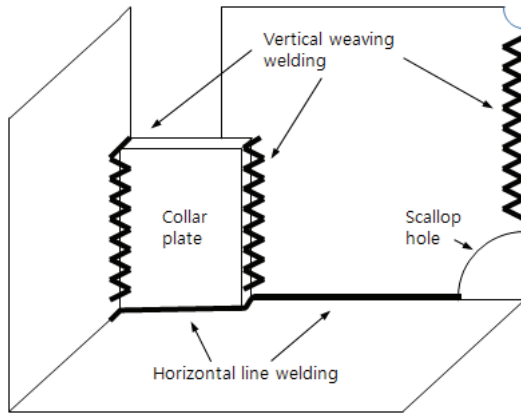


그림 12. 통상적인 U-cell의 용접 작업.

Fig. 12. Typical welding tasks in a U-cell.

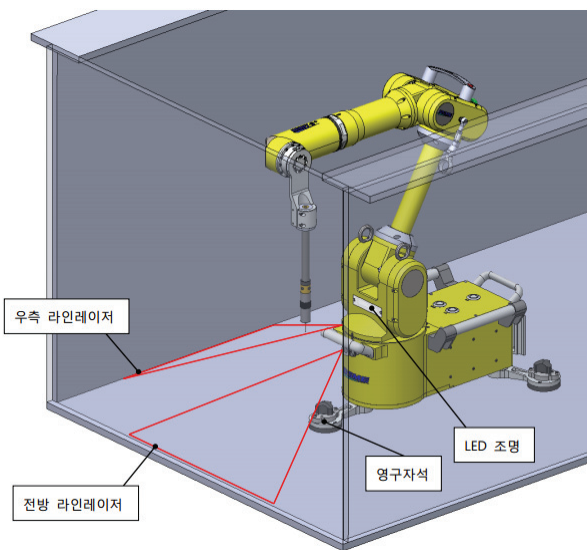


그림 13. 로봇과 U-cell 작업물 간의 위치 설정.

Fig. 13. Positioning robot in U-cell.

치수를 입력하면, OLP가 용접작업을 수행할 수 있는 일련의 작업 파일을 생성한다.

그런데 작업자가 로봇을 운반 후 위치시키기 때문에 U-cell에 대한 로봇의 상대 위치는 정확하지 않다. 또한, 작업물은 사전 공정에서 수동으로 제작되기 때문에 작업물의 치수는 설계정보와 많은 오차를 가지고 있다. 개발된 시스템에서는 라인 레이저와 터치 센서를 사용하여 이러한 오차를 보정하도록 하였다. 즉, 작업자는 로봇을 세팅 할 때 로봇의 전방과 우측에 부착된 라인 레이저가 U-cell의 수직과 바닥부의 직교하는 부분에 맞도록 하여 로봇과 U-cell의 상대위치를 맞춘다(그림 13).

그림 14는 개발된 용접 로봇을 사용하여 실제 작업 현장에서 용접을 수행하는 사진이다. 만약 이 작업에 캐리지를 사용한다면, 두 종류의 용접 캐리지가 필요하며, 용접 캐리지가 용접 작업을 수행하지 못하는 용접 시작과 종료 지점을 작업자가 수동 용접하여야 한다. 따라서, 작업자는 U-cell의 형태에 따라서 3번 이상의 캐리지 작업 준비가 필요하고, 수동 용접 작업 또한 수행하여야 한다. 하지만, 개발된 휴대용



그림 14. 개발된 용접 로봇을 사용한 용접 작업.

Fig. 14. Real welding job with the develop robot.

용접 로봇을 사용함으로써, 작업자는 수동 용접 작업 없이 한 번의 작업 준비로 U-cell 용접 작업을 수행할 수 있었다.

개발된 로봇을 사용하면 기존의 용접장비에 비해 생산성이 150% 개선되는 것을 볼 수 있었다. 대표적인 예로서, 그림 12와 같은 작업물의 경우 기존에 용접 작업에서는 작업자가 수평전용 캐리지를 사용하여 전면 아랫부분을 용접한 후, 수직전용 캐리지로 양쪽의 수직면을 용접한다. 캐리지는 양쪽과 위아래에 용접을 하지 못한 부분이 100mm씩 발생하므로, 작업자가 수동용접으로 마무리를 한다. 로봇 용접에서는 (1)작업자가 로봇을 들어서 용접할 부위에 내려 놓은 후 (2)손으로 움직여 라인레이저가 용접부위에 오도록 로봇의 위치를 조정하고 베이스의 자석을 잠근 후 (3)조작반을 사용하여 원하는 작업물의 형상을 선택 한 후 시작 버튼을 누른다. 이 후 로봇은 10~15분간 자동 용접을 하므로 작업자는 두 번째 로봇을 옮겨 다른 부위에 용접을 하도록 설치한다. 단순한 계산으로는 위의 방법으로 1인이 로봇을 3대까지 운용하여 2~3명분의 작업을 수행 할 수 있다. 그러나, 실제 적용 환경에서는 로봇을 옮기는 것에 대한 작업피로, 예상치 못한 상황에 대한 조치, 주변케이블의 정리 등이 필요하여, 1인당 로봇 2대까지 운용하는 것이 적절하였으며 생산성은 기존대비 150%까지 향상되었다.

VI. 결론

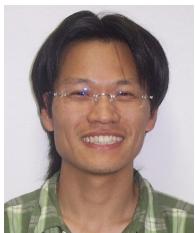
개발된 휴대용 용접 로봇은 조선 블록 제작에 성공적으로 적용되었다. 작업자는 좁은 맨홀과 론지 사이로 로봇을 들고 들어갈 수 있으므로, 기존에는 용접자동화가 어렵다고 생각되었던, 이중선체 블록의 내부나 선상의 의장품 등도 자동으로 용접할 수 있었다. 작업자는 조작반의 OLP 화면을 이용하여 로봇에게 작업을 시킬 수 있으므로, 2~3시간의 교육만으로도 원하는 작업을 수행할 수 있었다. EtherCAT을 사용함으로써 25m 이상의 케이블을 경량으로 제작할 수 있었으므로, 제어기로부터 로봇까지 이어진 케이블이 작업에 방해되지 않게 사용될 수 있었다.

그런데 실제 적용에서 로봇 본체 외의 주변장치를 옮기는 문제가 큰 어려움이 되었다. 우선 용접작업에 필수적인 와이어

피더가 로봇과 항상 함께 이동되어야 하므로, 큰 걸림이 되었다. 피더의 무게가 15kg 정도이고 여기에 통합형 용접케이블의 무게가 더해지므로, 로봇과 함께 이를 옮기는 것을 장시간 반복하는 것은 작업자에게 무리가 되었다. 또한, 로봇에 유선으로 연결된 로봇 조작반도 이동에 불편함을 가증시켰다. 그러므로, 이동성을 개선하기 위한 방안으로 피더의 경량화, 로봇과 피더의 일체화, 조작반의 무선화 등이 추후 개발 방향으로 검토되고 있다.

REFERENCES

- [1] J. Park et al., "Development of a 5 DOF portable welding robot with EtherCAT fieldbus," *Proc. of 2013 ICROS Daejeon-Chungcheong Regional Conference (in Korean)*, pp. 54-59, Dec. 2013.
- [2] J. Park et al., "An iterative algorithm for inverse kinematics of 5-DOF manipulator with offset wrist," *World Academy of Science, Engineering and Technology*, no. 72, pp. 94-99, 2012.
- [3] J. Park et al., "Development of a portable welding robot with EtherCAT interface," *World Academy of Science, Engineering and Technology*, no. 60, pp. 733-737, 2011.
- [4] EtherCAT Technology Group, "EtherCAT The Ethernet Fieldbus," <http://www.ethercat.org>.
- [5] S. G. Robertz et al., "Industrial robot motion control with real-time Java and EtherCAT," *IEEE Conf. Emerging Technologies and Factory Automation*, pp. 1453-1456, 2007.
- [6] Y. Moon et al., "A study on Development of soft-motor controller using EtherCAT," *Journal of Korean institute of intelligent systems*, vol. 17, no. 6, pp. 826-831, 2007.
- [7] IntervalZero, <https://www.intervalzero.com>
- [8] Koenig, <https://koenig-pa.com>
- [9] Y. Estrin et al., "Microstructure, texture and mechanical properties of the magnesium alloy AZ31 processed by ECAP," *Int. J. Materials Research*, pp. 50-55, Jan. 2008.
- [10] Copley Controls, Manual: Accelnet Plus Module EtherCAT AEM
- [11] Y. Youm, "The role of kinematics in robot development," *Journal of ICROS (in Korean)*, vol. 20, no. 3, pp. 333-344, 2014.



박 주 이

1991년 KAIST 생산공학과(공학사).
1993년 KAIST 정밀공학과(공학석사).
2001년 KAIST 기계공학과(공학박사).
2004년~현재 대우조선해양(주) 기전연구소 차장. 관심분야는 용접자동화로봇, 해양플랜트 무인화 로봇.



김 진 옥

2000년 울산대학교 전기공학과(공학사).
2002년 한양대학교 전자통신전공학과(공학석사). 2002년~2003년 한국한공우주산업(주). 2003년~현재 대우조선해양(주) 기전연구소 과장. 관심분야는 용접자동화로봇, 임베디드 시스템 제어.



김 정 민

2003년 한양대학교 기계공학과(공학사).
2005년 한양대학교 기계설계공학과(공학석사). 2005년~현재 대우조선해양(주) 기전연구소 과장. 관심분야는 포터블로봇, 시추자동화 시스템.



김 지 윤

2002년 중앙대학교 전자전기공학부(공학사). 2004년 중앙대학교 전기전자공학부(공학석사). 2004년~현재 대우조선해양(주) 기전연구소 과장. 관심분야는 지능로봇, 해양플랫폼 무인화 로봇.



김 응 지

2010년 경희대학교 기계공학과(공학사).
2012년 포항공과대학교 기계공학과(공학석사). 2012년~현재 대우조선해양(주) 기전연구소 연구원. 관심분야는 용접자동화로봇, 시추 자동화 시스템.



김 수 호

1980년 서울대학교 전기공학과(공학사).
2006년 한국산업기술대학교 지능제어공학과(공학석사). 1982년~현재 대우조선해양(주) 산업기술연구소 이사부장. 관심분야는 용접자동화로봇, 전선포설자동화.