

적응 제어 기반 Portable 용접 로봇 시뮬레이터 개발

구남국¹·하솔¹·노명일^{2,†}
서울대학교 조선해양공학과 대학원¹
울산대학교 조선해양공학부²

Development of a Motion Simulator for Portable Type Welding Robot Based on Adaptive Control

Nam-Kug Ku¹·Sol Ha¹·Myung-Il Roh^{2,†}
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University¹
School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan²

Abstract

It is not easy to know the accurate mass and mass moment of inertia of robot. Because of this uncertainty, error may exist when we control the robot based on the inaccurate mass information. Moreover the properties of the portable robot can change during its operation. Therefore we developed the motion simulator based on the adaptive control. First, the computed torque control was carried out in order to minimize an error between target angles and real angles. The computed torque control is based on the equation of robot motion, which is derived from the Lagrange-Euler equation. To minimize the error between the real model and the approximated model, the adaptive control was carried out. During this simulation, the interference check was also carried out. The interference check verifies that the robot can move successfully without any collision.

Keywords : Portable welding robot(포터블 용접 로봇), Motion simulator(모션 시뮬레이터), Robot dynamics(로봇 동역학), Robot control(로봇 제어), Computed torque control(계산 토크 제어), Adaptive control(적응 제어)

1. 서론

현재 많은 조선소에서 용접, 전처리, 도장 등의 공정을 자동화하려고 노력하고 있다. 이러한 연구 중 이중 선체 구조의 내부와 같이 협소하고 밀폐된 환경에서의 공정을 자동화하기 위해서는 더욱 새로운 아이디어의 도출이 필요하다 (Ku, et al., 2010). 일반적으로 로봇 등의 자동화 장비를 개발하기 위해서는 수많은 개념 설계 안을 도출하고 수정하는 과정을 반복해야 한다. 만약 개념 설계 안을 시뮬레이션할 수 있는 시뮬레이터가 있다면 개념 설계 안이 도출될 때마다 제품을 만들어서 기능과 성능을 테스트하는 수고와 비용을 절감할 수 있다. 하나의 개념 설계 안이 도출되면 개념 설계 안의 움직임(motion) 및 제어 특성을 시뮬레이션하여 개념 설계 안의 기능과 성능을 검증하고 문제점을 개선하여 새로운 개념설계 안에 반영할 수 있다. 범용 로봇 시뮬레이터의 경우 기구학(kinematics)을 기반으로 로봇의 움직임을 시뮬레이션한다. 기구학 기반의 시뮬레이터는 기구부(manipulator)의 자세 변화에 따른 동역학적 특성을 고려하지 못하기 때문에 기구의 자세에 따른 동역학적 특성을 포함하여 로봇의 모션을 제어할 수 있는 시뮬레이터가 필요하다.

용접 로봇, 전처리 로봇 등 조선용 작업 로봇의 움직임 제어를 위해서는 모터 컨트롤러라는 하드웨어가 필요하다. 현재 산업용으로 사용되고 있는 모터 컨트롤러는 Fig. 1과 같은 형태를 가지고 있다.

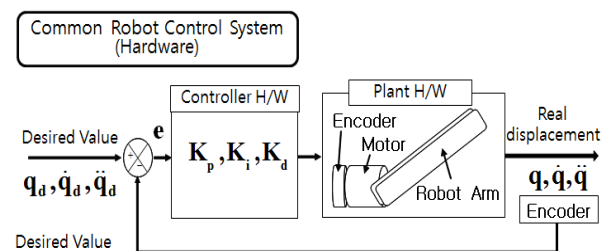


Fig. 1 Common robot control system using hardware

예컨대, 로봇의 끝단(용접 로봇의 경우 토치가 장착되는 부분)이 원하는 경로를 따라 움직이게끔 하려면 그러한 움직임이 가능하도록 로봇 기구부의 각 관절에 전달되어야 하는 힘 및 토크가 정확하게 계산되어야 한다. 이러한 과정은 Fig. 1과 같은 모터 컨트롤러에 의해 수행되며, 각 관절에 전달되어야 하는 힘 및 토크는 몇 가지 제어 계수(K_p , K_i , K_d)의 추정치에 의해 결정된다.

이들 제어 계수는 해당 로봇의 기구부에 대해 반복적인 실험을 통해 결정될 수 있으며, 만약 로봇 개선 등의 이유로 기구부가 변경될 경우 이들은 실험을 통해 다시 결정되어야 한다. 즉, 제어 계수의 결정 과정은 많은 시행착오를 필요로 한다.

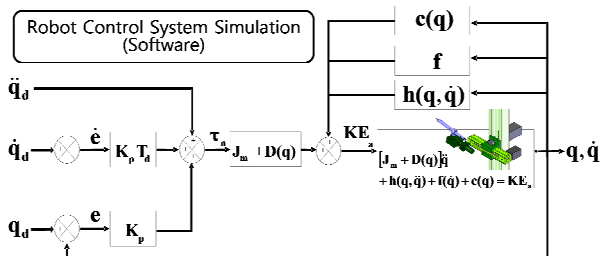


Fig. 2 Robot control system simulation using software

로봇의 설계 단계에서는 시제품을 제작하지 않는 한 이들 계수의 결정 과정을 하드웨어적으로 수행하기가 곤란하다. 따라서 이러한 과정을 소프트웨어적으로 수행하기 위해서는 모션 시뮬레이터가 요구된다. 따라서 설계 단계에서 발생할 수 있는 빈번한 로봇 기구부의 설계 변경에 대응하여 적절한 로봇의 움직임을 구현토록 하는 제어 계수를 효과적으로 결정하기 위해, 본 연구에서는 소프트웨어적인 모션 시뮬레이터를 개발하였다. 즉, 본 연구에서는 로봇의 움직임을 소프트웨어적으로 미리 시뮬레이션함으로써 모터 컨트롤러의 제어 계수를 효과적으로 결정할 수 있는 모션 시뮬레이터(motion simulator)를 개발하였다. Fig. 2는 모터, 모터 컨트롤러 및 감속기를 포함한 로봇의 운동을 수학적으로 모델링하여 해석적인 풀이를 수행하는 소프트웨어적인 로봇 제어 기법(모션 시뮬레이터)을 나타낸 것이다.

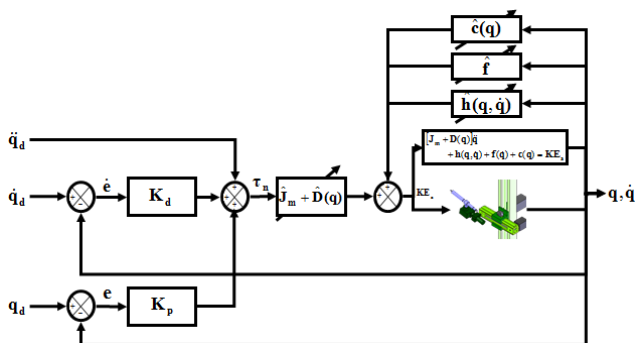


Fig. 3 Robot control system simulation using adaptive control

본 연구에서는 모터와 감속기를 포함한 로봇 기구부의 동역학 운동 방정식을 수학적으로 모델링하고, 이를 이용하여 계산 토크 제어(computed torque control)를 수행할 수 있는 시뮬레이터를 개발하였다. 또한, 실제 로봇과 추정된 수학적 모델 사이에 오차가 존재하더라도 이를 극복하여 제어를 수행할 수 있는 적응 제어(adaptive control) 방식을 개발된 시뮬레이터에 반영하였다. Fig. 3은 본 연구에서 수행한 적응 제어 방식을 적용한 로봇 제어 기법을 나타낸 것이다.

끝으로, 본 연구에서 개발한 시뮬레이터를 활용하여 Kwon (2008)의 용접 작업용 고정식 4축 portable 로봇(Fig. 4 참조)의 기구학, 동역학(dynamics) 계산 및 로봇 모션을 시뮬레이션해 봄으로써 개발된 시뮬레이터의 효용성을 검증하였다.

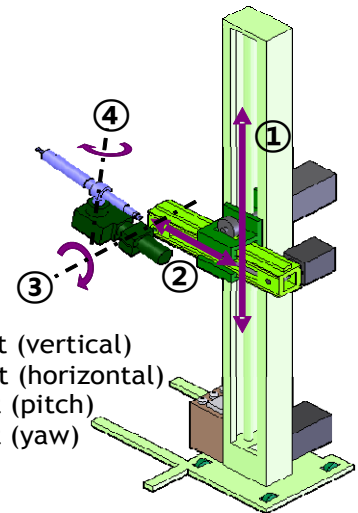


Fig. 4 Conceptual design of a portable type welding robot for butt welding

2. 관련 연구 현황

로봇을 설계하고 제작하기 이전에 로봇의 자세 및 현장 적용성을 판단하기 위하여 대부분 상용으로 판매되고 있는 범용 로봇 모션 시뮬레이터를 사용한다. 현재 널리 쓰이고 있는 범용용 형상 모델링 및 모션 시뮬레이션 소프트웨어는 Table 1과 같다. 이들은 범용으로 개발되었기 때문에 어디에나 적용할 수 있는 반면에 지나치게 큰 구조를 가지고 있다. 또한 주로 기구학만을 다루고 있으며 동역학 관련 기능이 취약한 실정이다. 따라서 소규모 연구의 경우 필수 기능만을 수행하는 전용 시뮬레이터의 개발이 필요하다.

Table 1 Software for geometric modeling and simulation of a robot

Field	Software
Modeling	CATIA, NX(UniGraphics), SolidEdge, SolidWorks, Pro-e, Auto-CAD
Motion Simulation	IGRIP, DPM-Assembly, DPM-Human, UltraArc, VirtualNC, eM-Machining, eM-Press, eM-Human, eM-WorkplacePC(RobCAD)

이상과 같은 범용의 모션 시뮬레이터 외에 전용 시뮬레이터의 개발과 관련한 몇 가지 연구를 소개하면 다음과 같다.

Becerra, et al. (2004)은 'PUMA 560'이라는 로봇의 동역학 운동 방정식을 수학적으로 모델링하고 그 거동을 제어할 수 있는 시뮬레이터를 개발하였다. 이 연구에서는 PUMA 560의 동역학

모델을 기반으로 계산 토크 제어를 활용하여 로봇의 움직임을 제어하였다. 즉, 로봇의 끝단이 움직이는 궤적을 생성하고 각 링크(관절과 관절 사이의 로봇 팔 부분에 필요한 토크를 계산하였다. 그리고 실제 PUMA 560을 시뮬레이터에 연결하여 로봇의 거동을 측정하였다. 그러나 수학적 모델과 실제 로봇간의 기구적 차이에 의한 제어 값의 오차가 지속적으로 나옴이 확인되었다.

Harmer (2003)는 'RRR-Manipulator'라는 로봇의 동역학 운동 방정식을 수학적으로 모델링하고 그 거동을 제어할 수 있는 시뮬레이터를 개발하였다. 이 연구에서는 수학적 모델과 실제 로봇간의 기구적 차이에 의한 제어 값의 오차를 줄이기 위해 적응 제어 방식을 적용하였다. 그 결과, 각종 제어 계수의 적절한 값을 찾는 데 오랜 시간이 소요되었지만 계산 토크 제어에 비해 적응 제어 방식이 보다 나은 제어 성능을 보여주는 것을 확인하였다.

Kim (2007)은 유압 굴삭기의 동역학 운동 방정식을 Newton-Euler 방법에 의해 유도하였고, 이를 바탕으로 유압 굴삭기의 비례-미분-적분(PID) 제어와 적응 제어를 수행하여 그 결과 값을 비교하였다. 그 결과, PID 제어 대비 적응 제어 방식이 보다 나은 제어 결과를 도출함을 확인하였다.

수행할 수 있는 전용의 로봇 모션 시뮬레이터를 개발하였다. 개발된 시뮬레이터는 정/역기구학을 계산하는 기능(Fig. 5-①), 용접 경로와 자세를 보간(interpolation)하는 기능(Fig. 5-②), 로봇 동역학 식을 이용하여 각 관절의 토크 값을 계산하는 기능(Fig. 5-③), 계산된 토크 값을 이용하여 관절의 각도를 제어하는 기능(Fig. 5-④)을 가지고 있다.

3.1 로봇 기구학(robot kinematics)

로봇을 제어하기 위해 사용자는 로봇의 각 관절을 회전시켰을 때, 로봇 끝단의 위치와 자세가 어떻게 될지 계산할 수 있어야 한다. 이처럼 로봇의 각 관절 값이 주어졌을 때 로봇 끝단의 위치와 자세를 계산하는 것을 정기구학(forward kinematics)이라고 한다. 이와 반대로 사용자가 원하는 로봇 끝단의 위치와 자세가 주어졌을 때 각 관절을 얼마만큼 회전시켜야 하는지 계산하는 것을 역기구학(inverse kinematics)이라고 한다 (Fu, et al., 1987; Spong & Vidyasagar, 1989; Murray, et al., 1994; Niku, 2001; Craig, 2005).

3. 로봇의 모션 시뮬레이터 개발

3.1.1 정기구학(forward kinematics)

본 연구에서는 설계 단계에서 필수적으로 요구되는 기능만을

본 연구에서는 로봇의 정기구학 계산을 위하여 Denavit-

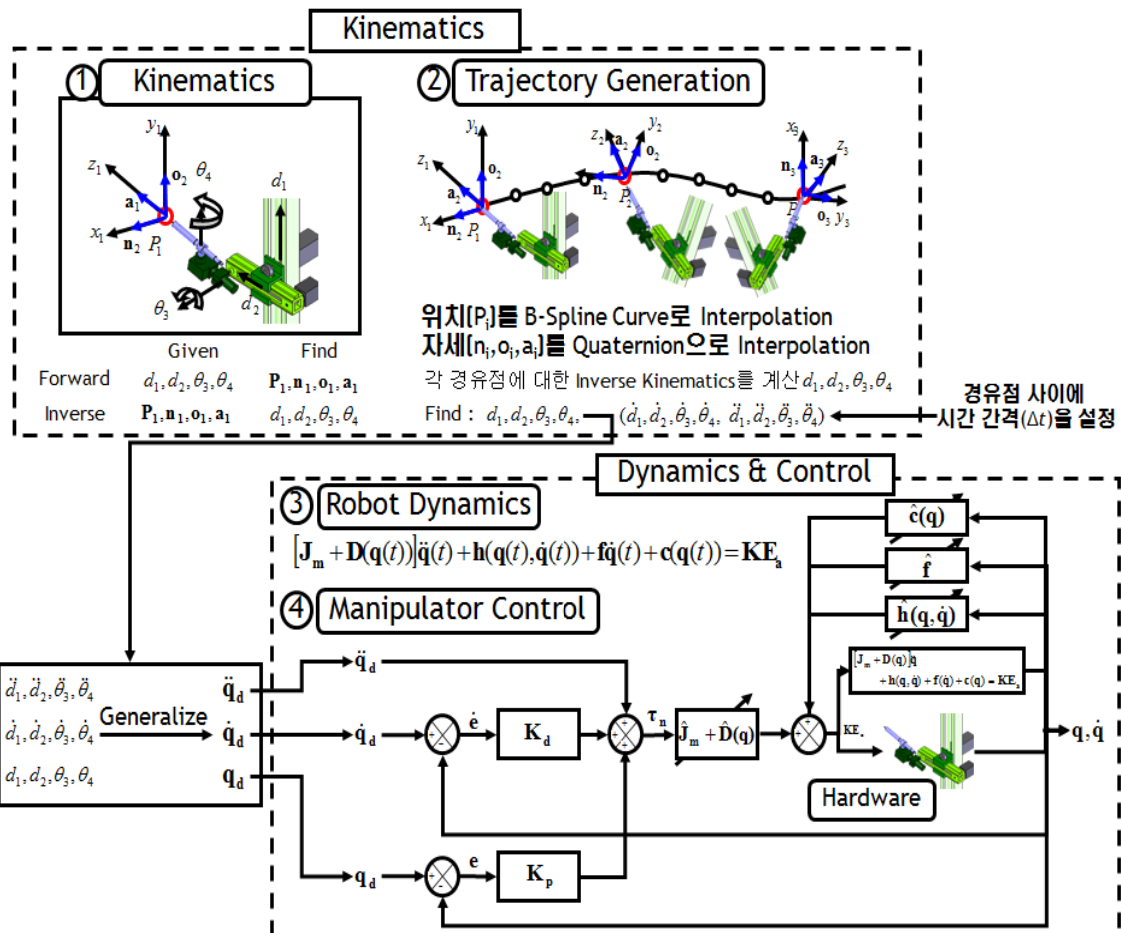


Fig. 5 Flow of the developed robot motion simulator

Hartenberg법(이하 D-H법)을 사용하였다. D-H법은 3차원 상의 로봇 관절에 설정된 로컬 좌표계간의 상호 관계를 다음의 4가지 변환을 수행함으로써 표현한다(Fig. 6 참조).

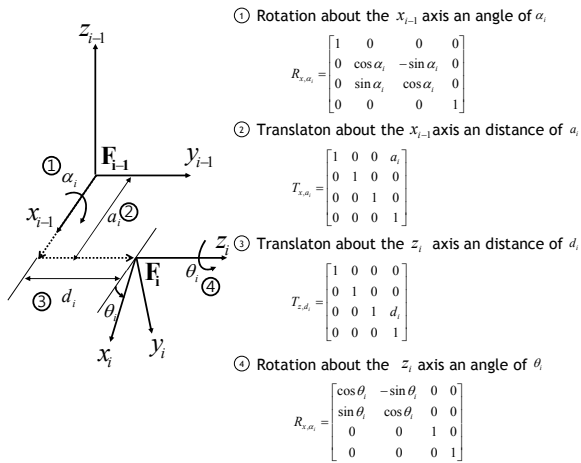


Fig. 6 Meaning of Denavit-Hartenber representation

식 (1)은 위 4가지 변환을 수행하는 변환 매트릭스 ${}^{i-1}A_i$ 를 나타낸 것이다.

$${}^{i-1}A_i = R_{x,\alpha_i} T_{x,a_i} T_{z,d_i} R_{z,\theta_i} \quad (1)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_i \\ \cos \alpha_i \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i - \sin \alpha_i & -d_i \sin \alpha_i & \\ \sin \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \cos \theta_i & \cos \alpha_i & d_i \cos \alpha_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

여기서, $\alpha_i, a_i, d_i, \theta_i$ 는 i 번째 축에서의 D-H 파라미터이다.

본 연구에서 적용 대상으로 가정한 용접 작업용 고정식 4축 portable 로봇(Fig. 7 참조)의 각 축(2축 병진, 2축 회전)에 대해 적용한 D-H 파라미터는 Table 2와 같다.

로봇의 각 관절 값이 주어졌을 때 로봇 끝단의 위치와 자세를 계산하는 정기구학식은 각 관절의 D-H 행렬을 순차적으로 곱하면 구할 수 있다. 식 (2)~(4)는 개념 설계 로봇의 정기구학 식을 나타낸다 (Farin & Hansford, 2000). 여기서, S_i 는 $\sin \theta_i$ 를, C_i 는 $\cos \theta_i$ 를 의미한다.

Table 2 D-H parameters for the conceptual design of the portable type welding robot

	α_i	a_i	d_i	θ_i
0A_1	0	0	$L_1 + d_1$	0
1A_2	90	L_2	d_2	90
2A_3	90	0	L_3	$90 + \theta_3$
3A_4	90	L_4	L_5	$90 + \theta_4$
${}^4A_{Torch}$	90	0	L_6	0

$$T = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 {}^3A_4 {}^4A_{Torch} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & P_x \\ n_y & o_y & a_y & P_y \\ n_z & o_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

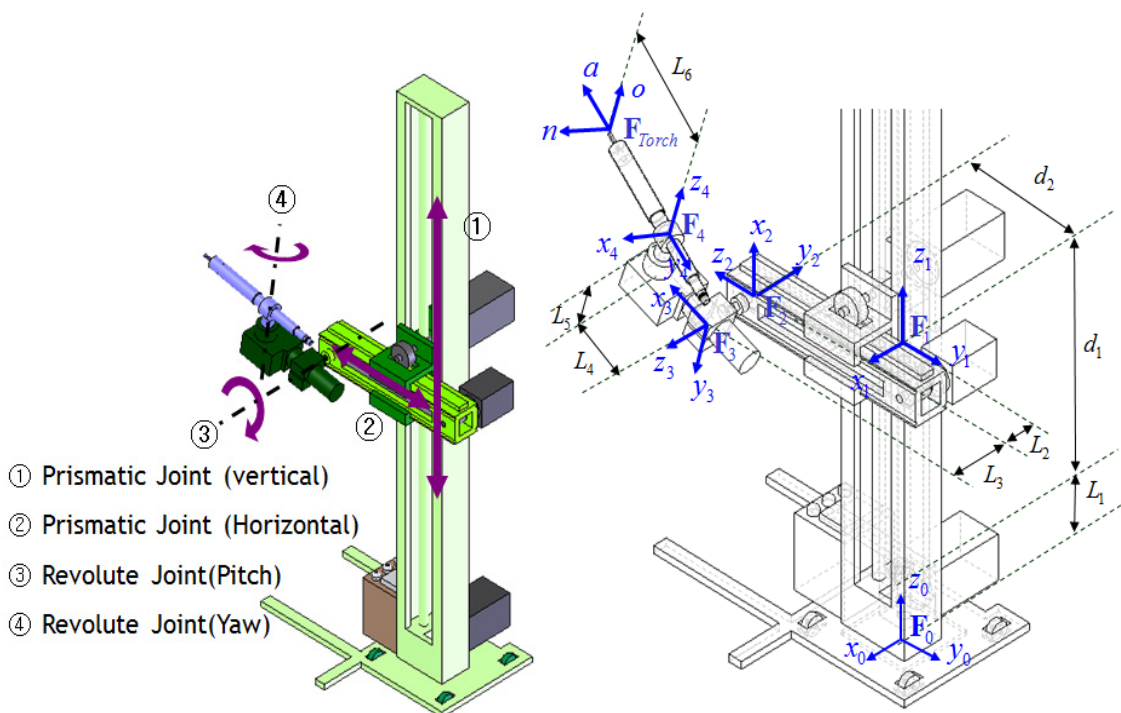


Fig. 7 Coordinate and dimension system of the conceptual design of the portable type welding robot

$$\begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_4 & 0 & S_4 \\ C_3 S_4 - S_3 - C_3 C_4 \\ S_3 S_4 & C_3 & -S_3 C_4 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_6 S_4 + L_3 + L_2 \\ -L_6 C_3 C_4 - L_4 C_3 - L_5 S_3 - d_2 \\ -L_6 S_3 C_4 - L_4 S_3 + L_5 C_3 + L_1 + d_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

3.1.2 역기구학(inverse kinematics)

앞서 언급하였듯이, 사용자가 원하는 로봇 끝단의 위치와 자세가 주어졌을 때 각 관절을 얼마만큼 회전시켜야 하는지 계산하는 것을 역기구학이라고 한다. 식 (5)~(8)은 본 연구에서 적용 대상으로 가정한 용접 작업용 고정식 4축 로봇(Fig. 7 참조)의 역기구학을 나타낸 것이다.

$$\theta_3 = \arccos(\sqrt{n_y^2 + a_y^2}) \quad (5)$$

$$\theta_4 = \arctan\left(\frac{n_z}{n_y}\right) \quad (6)$$

$$d_1 = P_z + L_6 S_3 C_4 + L_4 S_3 - L_5 C_3 - L_1 \quad (7)$$

$$d_2 = -L_6 C_3 C_4 + L_4 C_3 - L_5 S_3 - P_y \quad (8)$$

3.2 로봇 궤적 생성(trajectory generation)

로봇이 용접 작업을 수행하기 위해서는 Fig. 8에서와 같이 로봇의 끝단이 움직이는 경로와 그 위치에서의 자세를 생성해야 한다. 본 연구에서는 로봇의 끝단이 반드시 지나야 하는 용접 점을 Cubic B-Spline 보간을 통해 부드러운 곡선으로 연결하는 경로를 생성하였다. 또한 초기 자세와 최종 자세 사이의 변화를 사원수(quaternion)를 이용하여 보간함으로써 부드러운 움직임을 얻을 수 있었다.

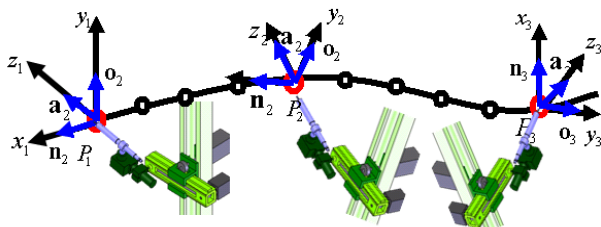


Fig. 8 Trajectory generation using cubic B-spline interpolation and quaternion interpolation

3.2.1 Cubic B-Spline 보간: 경로 보간

본 연구에서는 곡선 상의 점(P)과 곡선의 노트(knot, u), 양 끝

단의 접선 벡터(t₀, t₁)가 주어졌을 때, Fig. 9를 이용하여 Cubic B-Spline 곡선을 생성하였다.

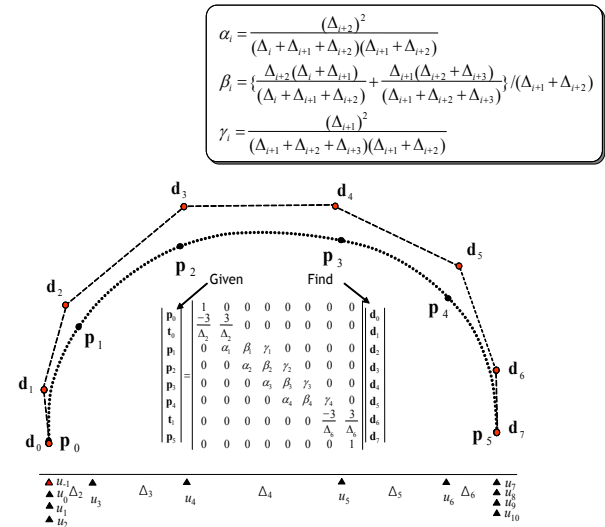


Fig. 9 Cubic B-spline interpolation for generating welding path

3.2.2 사원수(quaternion) 보간: 자세 보간

사원수는 차원 공간에서의 점과 벡터의 회전 변환을 대수적인 곱으로 표현하기 위하여 도입한 개념이다 (Chou, 1992). 사원수는 식 (9)와 같이 정의된다.

$$q = w + x \cdot i + y \cdot j + z \cdot k \quad (9)$$

where $w, x, y, z \in \mathbb{R}$,

$$i^2 = j^2 = k^2 = ijk = -1$$

처음 자세와 끝 자세를 각각 사원수로 표현하면 q₀와 q₁으로 표시할 수 있고, Fig. 10에서와 같이 구상에서 부드럽게 보간이 가능하다.

즉, 식 (10)의 파라미터 t를 변화시키면 경유점에서의 자세를 구할 수 있다.

$$q(t) = \frac{q_0 \sin((1-t)\theta) + q_1 \sin(t\theta)}{\sin(\theta)} \quad (10)$$

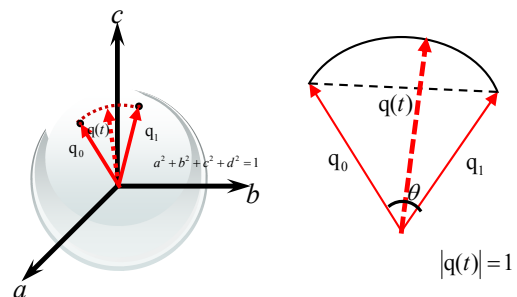


Fig. 10 Quaternion interpolation for generating welding attitude

4. 로봇의 모션 제어 검증

본 연구에서는 로봇의 모션을 제어하기 위해 모터와 감속기에 의한 영향을 고려하여 로봇 동역학 운동 방정식을 세우고, Yaw축에 대해 적응 제어를 적용하여 링크(관절과 관절 사이의 로봇 팔 부분)의 위치를 제어하였다.

4.1 로봇 동역학 운동 방정식

로봇 동역학은 다음과 같은 내용을 다룬다.

- 로봇의 관절 값에 따른 위치, 속도, 가속도
- 각 관절에 작용하는 힘과 토크
- 로봇의 치수 정보(링크의 길이, 질량, 관성 모멘트)

본 연구에서 개발한 시뮬레이터는 각 관절의 기구적 특성에 기반하여 힘과 모멘트를 구한다. 이는 현실과 완벽하게 일치하지는 않지만 로봇이 동작을 수행하기 위해 각 관절에서 요구되는 힘과 토크(모멘트)의 크기를 결정하는데 좋은 아이디어를 제공한다.

Lagrange-Euler 식은 시스템(로봇)이 가진 에너지의 양을 기반으로 정의한다 (Calkin, 1998; Goldstein, et al., 2002; Spong, et al., 2006). Lagrangian(L)은 식 (11)에서와 같이 로봇의 총 운동 에너지(K)와 포텐셜 에너지(P)의 차이로서 정의된다.

$$L = K - P \tag{11}$$

$$\tau_i = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} \tag{12}$$

여기서,

L =Lagrangian function=Kinematic energy K =Potential energy P

K = total Kinematic energy of the robot arm

P = total Kinematic energy of the robot arm

q_i = generalized coordinate of the robot arm for i th link

\dot{q}_i = first derivative of the generalized coordinate, q_i , for i th link

τ_i = generalized force for i th link

Lagrange-Euler 식을 이용하여 로봇 동역학 운동 방정식을 유도하는 과정은 다음과 같다.

- (1) D-H법에 따라 각 링크간 관계를 설정한다.
- (2) 각 링크의 좌표계와 기준 좌표계간의 변환 행렬 0A_i 를 구성한다.
- (3) 아래 식을 이용하여 행렬 U_{ij} 를 구성한다. 또한, 0A_i 의 q_j 편미분을 수행하는 미분 행렬 Q_i 를 구성한다.

$$U_{ij} = \frac{\partial {}^0A_i}{\partial q_j} = \begin{cases} {}^0A_i {}^1A_2 \cdots {}^{j-1}A_j Q_j \cdots A_{i-1} {}^{i-1}A_i & , (j \leq i) \\ 0 & , (j > i) \end{cases} \tag{13}$$

$$Q_i = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} : \text{for revolute joint} \tag{14}$$

$$Q_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} : \text{for prismatic joint} \tag{15}$$

(4) 아래 식을 이용하여 U_{ijk} 를 구성한다.

$$U_{ij} = \frac{\partial}{\partial q_k} \left(\frac{\partial {}^0A_i}{\partial q_j} \right) = \begin{cases} {}^0A_i {}^1A_2 \cdots {}^{j-1}A_j Q_j \cdots {}^{k-1}A_k A_k \cdots {}^{i-2}A_{i-1} {}^{i-1}A_i & , (j \leq i) \\ 0 & , (j > i) \end{cases} \tag{16}$$

(5) 아래 식을 이용하여 각 링크의 Pseudo-Inertia 행렬 J_i 를 구성한다.

$$J_i = \int {}^i r_i^i r_i^T dm = \begin{bmatrix} \int x_i^2 dm & \int x_i y_i dm & \int x_i z_i dm & \int x_i dm \\ \int x_i y_i dm & \int y_i^2 dm & \int y_i z_i dm & \int x_i y_i dm \\ \int x_i z_i dm & \int y_i z_i dm & \int z_i^2 dm & \int z_i dm \\ \int x_i dm & \int y_i dm & \int z_i dm & \int dm \end{bmatrix} \tag{17}$$

(6) 아래 식을 이용하여 Acceleration-Related 행렬 D 를 구성한다.

$$D = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & D_{14} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} & D_{24} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} & D_{34} \\ D_{41} & D_{42} & D_{43} & D_{44} \end{bmatrix} \tag{18}$$

여기서,

$$D_{ik} = \sum_{j=\max(i,k)}^n \text{Tr}(U_{jk} J_j U_{ji}^T) \quad i, k = 1, 2, \dots, n$$

(7) 아래 식을 이용하여 Corioli and Centrifugal 항 h 를 구성한다.

$$h(q, \dot{q}) = (h_1, h_2, \dots, h_n)^T \tag{19}$$

여기서,

$$h_i = \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^n h_{ikm} \dot{q}_k \dot{q}_m \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$h_{ikm} = \sum_{j=\max(i,k,m)}^n \text{Tr}(\mathbf{U}_{jkm} \mathbf{J}_j \mathbf{U}_{ji}^T) \\ i, k, m = 1, 2, \dots, n$$

(8) 아래 식을 이용하여 중력(gravitational force) 항 \mathbf{c} 를 구성한다.

$$\mathbf{c}(\mathbf{q}) = (c_1, c_2, \dots, c_n)^T \quad (20)$$

여기서,

$$c_i = \sum_{j=i}^n (-m_j \mathbf{g} \mathbf{U}_{ji}^j \bar{\mathbf{r}}_j) \quad i = 1, 2, \dots, n$$

(9) 최종적으로 로봇 동역학 운동 방정식은 식 (21)과 같다.

$$\boldsymbol{\tau}(t) = \mathbf{D}(\mathbf{q}(t))\ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{h}(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)) + \mathbf{c}(\mathbf{q}(t)) \quad (21)$$

식 (21)에 추가적으로 모터와 감속기 특성을 포함한 최종 운동 방정식은 식 (22)와 같이 정리된다.

$$[\mathbf{J}_m + \mathbf{D}(\mathbf{q}(t))]\ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{h}(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)) + \mathbf{f}(\dot{\mathbf{q}}(t)) + \mathbf{c}(\mathbf{q}(t)) = \mathbf{K}\mathbf{E}_a \quad (22)$$

여기서,

$$\mathbf{J}_m = \begin{bmatrix} J_{M11} & \dots & 0 \\ 0 & J_{M22} & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & J_{ii} \end{bmatrix}, J_{Mii} = k_i^2 J_{Mi}$$

: motor inertia matrix

$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} D_{11} & \dots & 0 \\ 0 & D_{22} & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & D_{ii} \end{bmatrix}, f_{ii} = (f_{Mi} + K_i^2/R_{ai})k_i^2$$

: friction matrix

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_{11} & \dots & 0 \\ 0 & K_{22} & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & K_{nn} \end{bmatrix}, K_{ii} = k_i K_i / R_{ai}$$

: motor coefficient

k : reduction ratio

E_a : supplied voltage

R : electrical resistance of motor

4.2 계산 토크 제어

본 연구에서는 로봇의 모션에 있어서 비선형 항과 연성(coupled) 항의 영향을 고려하기 위해 모터, 감속기 특성을 고려한 운동 방정식(식 (22), Fig. 11-①)을 이용하여 계산 토크 제어(Fig. 11)를 수행하였다. 계산 토크 제어는 식 (22)에서 외력으로 주어지는 $\mathbf{K}\mathbf{E}_a$ 를 합리적으로 계산(Fig. 11-②)하여 목표 위치(\mathbf{q}_d), 속도($\dot{\mathbf{q}}_d$), 가속도($\ddot{\mathbf{q}}_d$)로 로봇의 기구부를 제어하는 방식이다.

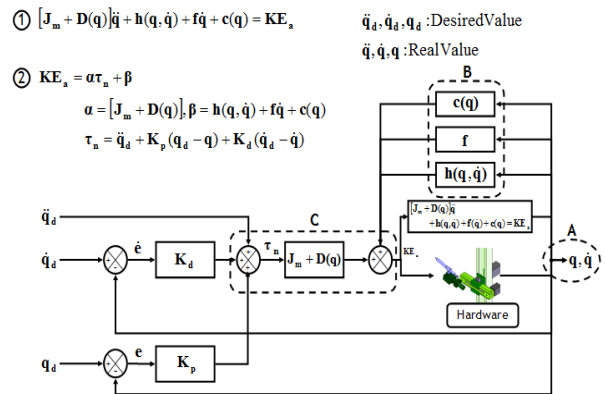


Fig. 11 Block diagram for the computed torque control of the robot manipulator

Fig. 11-②와 같이 계산된 $\mathbf{K}\mathbf{E}_a$ 를 통해 로봇의 기구부를 제어하게 되면 식 (23)과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$[\mathbf{J}_m + \mathbf{D}(\mathbf{q})]\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{f}(\dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{c}(\mathbf{q}) \quad (23) \\ = [\mathbf{J}_m + \mathbf{D}(\mathbf{q})]\mathbf{q}_{dd} + \mathbf{K}_p \mathbf{T}_d (\dot{\mathbf{q}}_d - \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{K}_p (\mathbf{q}_d - \mathbf{q}) \\ + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{f}(\dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{c}(\mathbf{q})$$

이를 다시 한 번 정리하면 식 (24)를 얻을 수 있다.

$$[\mathbf{J}_m + \mathbf{D}(\mathbf{q})]\ddot{\mathbf{q}} = [\mathbf{J}_m + \mathbf{D}(\mathbf{q})]\ddot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{K}_p \mathbf{T}_d (\dot{\mathbf{q}}_d - \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{K}_p (\mathbf{q}_d - \mathbf{q}) \quad (24) \\ \ddot{\mathbf{q}} = \ddot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{K}_p \mathbf{T}_d (\dot{\mathbf{q}}_d - \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{K}_p (\mathbf{q}_d - \mathbf{q}) \\ \ddot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_p \mathbf{T}_d \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_p \mathbf{e} = 0$$

식 (24)는 우리에게 제어 계수 K_p 와 K_d 를 설정하는 아이디어를 제공한다. 오차에 대한 2계 상미분 방정식인 식 (24)가 0에 수렴하기 위해서는 특성 방정식의 해가 음수가 되는 제어 계수 K_p 와 $K_d (= K_p \mathbf{T}_d)$ 를 선택해야 한다. 계산 토크 제어는 비선형 항 $\mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 이나 관성 행렬 $\mathbf{D}(\mathbf{q})$ 을 고려한 운동 방정식을 사용하여 제어를 수행하므로, 선형 운동방정식으로 단순화한 제어 방식에 비해 정확한 값을 얻을 수 있었다.

Fig. 12는 용접 작업용 고정식 4축 로봇의 마지막 축(Yaw 축)에 대한 계산 토크 제어 결과를 나타낸다.

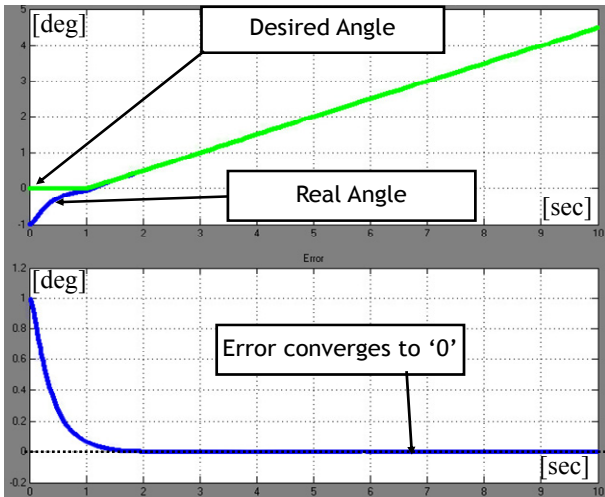


Fig. 12 Result of the computed torque control of the robot manipulator

4.3 적응 제어

계산 토크 제어 방식에 의해 정확한 제어를 하기 위해서는 KE_d 값을 정확히 계산해야 하고, 이를 위해서는 실제 모델을 수학적 으로 정확히 모델링해야 한다. 그렇지 않을 경우, 식 (24)의 우변 에 오차 항이 남아있게 되며, 이러한 상황을 개선하지 않고 사용 하는 것을 추정 계산 토크 제어(approximated computed torque control)라고 한다. Fig. 13에서 알 수 있듯이, 추정 계산 토크 제 어 방식에서는 오차가 0에 수렴하지 않는다.

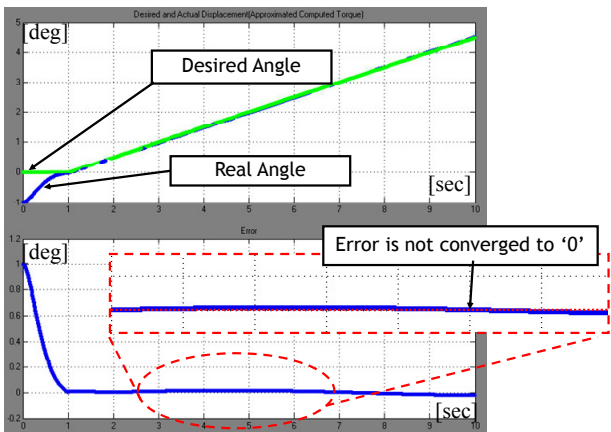


Fig. 13 Result of the approximated computed torque control of the robot manipulator

적응 제어는 이런 차이가 발생하더라도 로봇의 안정성을 보장 하는 조건(update rule)을 이용하여 오차를 0으로 수렴시킨다 (Lewis, et al., 2004; Craig, 1988). 실제 모델과 추정치 사이의 오차가 발생할 경우 오차 방정식은 다음과 같다.

$$\ddot{e} + K_d \dot{e} + K_p e = [\hat{J}_m + \hat{D}]^{-1} ([J_m + D] - [\hat{J}_m + \hat{D}]) \ddot{q} + (\hat{h} - h) + (\hat{f} - f) + (\hat{c} - c) \quad (25)$$

우변을 수학적 모델의 기구학적 파라미터를 원소로 가지는 벡터 $\hat{\Phi}$ 에 대한 행렬 곱 형태로 나타내면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\ddot{e} + K_p T_d \dot{e} + K_p e = [\hat{J}_m + \hat{D}]^{-1} W(q, \dot{q}, \ddot{q})(\Phi - \hat{\Phi}) \quad (26)$$

$$= [\hat{J}_m + \hat{D}]^{-1} W(q, \dot{q}, \ddot{q}) \tilde{\Phi}$$

여기서,

$W(q, \dot{q}, \ddot{q})$: matrix of known function

Φ : vector of unknown constant parameters

$\hat{\Phi}$: vector used to represent a time-varying estimate of the unknown constant parameters

이때, 로봇을 안정하게 만들어 주는 다음의 update rule(식 (27))을 이용하여 우변의 $\tilde{\Phi}$ 를 스텝 별로 업데이트 시켜주게 되면 시스템의 안정성 즉, 오차가 0으로 수렴하는 것을 보장한다.

$$\dot{\hat{\Phi}} = -\Gamma^{-1} W^T [\hat{J}_m + \hat{D}]^{-1} B^T P x \quad (27)$$

여기서,

P : positive-definite, constant, symmetric matrix

Γ : diagonal, positive-definite matrix

Fig. 14는 Fig. 7의 개념 설계 안에서 마지막 축인 Yaw 축의 거동에 적응 제어를 적용한 결과를 나타내고 있다.

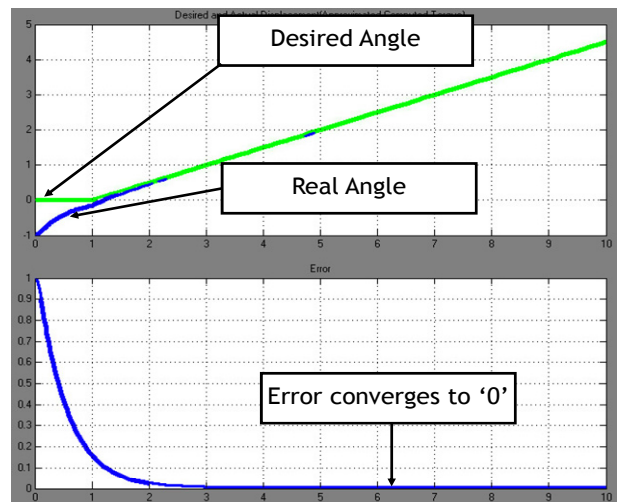


Fig. 14 Result of the adaptive control of the robot manipulator

위의 시뮬레이션 결과를 확장하여 4축 모두에 대하여 적응 제 어 시뮬레이션을 수행 하였다. 계산 결과는 Fig. 15, 16에 그래프 로서 나타내었으며, 점선이 목표 관절 값을 의미한다. Fig. 15는

추정 계산 토크 제어를 적용한 결과로서 제어 결과 오차가 발생함을 알 수 있다.

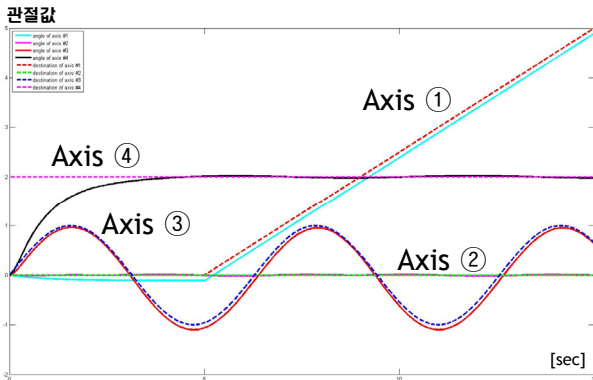


Fig. 15 Result of the approximated computed torque control of the robot manipulator (4-axis)

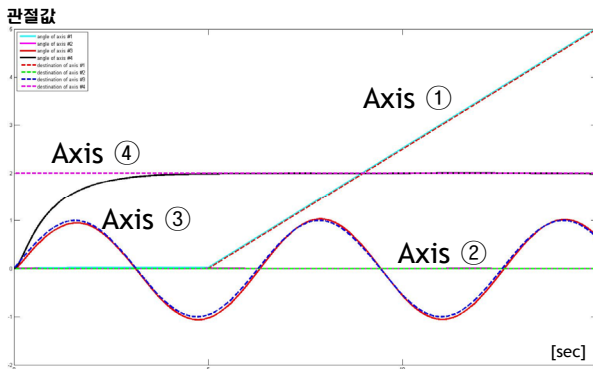


Fig. 16 Result of the adaptive control of the robot manipulator (4-axis)

그러나 Fig. 16에서 보는 바와 같이 적응 제어 시뮬레이션을 수행하면 오차가 더 작아졌음을 볼 수 있다.

5. 결론 및 향후 연구 계획

본 연구에서는 로봇의 자세 및 실제 거동을 로봇 제작 전에 확인할 수 있는 모션 시뮬레이터를 개발하였고, 개발된 시뮬레이터의 효용성을 검증하기 위해 이종 선체 블록의 보강재(longitudinal stiffeners)간의 맞대기(butt) 용접을 수행하는 Portable 용접 로봇의 개념 설계 안에 적용해 보았다.

또한 적응제어방법을 적용하여 단축에 대해서 동역학적인 제어 특성을 살펴봄으로써 개발된 시뮬레이터의 효용성을 개략적으로 검증하였다. 또한 적응제어방법을 적용하여 4축을 모두 제어한 결과 목표 관절 값에 더욱 근접한 제어가 가능함을 확인하였고, 이는 용접선의 궤적을 정확하게 입력한다는 가정 하에, 보다 정확하게 용접선을 쫓으며 용접을 할 수 있다는 것을 의미한다.

현재 본 연구의 후속 연구로서 아래 Fig. 17에서 보는바와 같이 이종 선체 블록의 보강재 간의 맞대기 용접을 수행하는 4축 용접로봇의 실제 하드웨어를 제작하는 중이다.

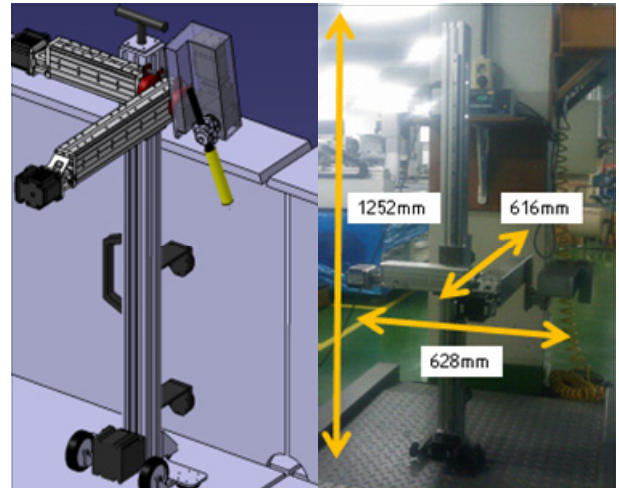


Fig. 17 A portable type welding robot for butt welding is under development

제작한 하드웨어에 본 논문의 연구 결과를 적용하여 실제 어느 정도의 성능 향상을 보여주는지 테스트할 예정이다. 또한 본 논문의 연구 결과는 조선 현장에서 널리 설계되어 사용되는 6축 로봇 (Park & Lee, 2009)의 제어에도 활용할 수 있을 것이라고 예상 한다.

후 기

본 연구는

- (a) 지식경제부 산업원천기술개발사업(10035331, 시뮬레이션 기반의 선박 및 해양플랜트 생산기술 개발)
- (b) 국방과학연구소 수중운동체기술특화센터 SM-11 과제 "수중 운동체의 체계/부체계 기능 및 성능 시뮬레이션을 위한 네트워크 기반의 가상 복합 시스템 모델 구조 연구"
- (c) 서울대학교 BK21 해양 기술 인력 양성 사업단
- (d) 서울대학교 해양시스템공학연구소
- (e) 한국연구재단(R33-2008-000-10150-0)

참 고 문 헌

- Becerra, V.M. Cage, C.N.J. Harwin, W.S. & Sharkey, P.M., 2004. Hardware Retrofit and Computed Torque Control of a Puma 560 Robot Updating an Industrial Manipulator. *IEEE Control Systems*, 24(5), pp.78-82.
- Calkin, M.G., 1998. *Lagrangian and Hamiltonian Mechanics Solutions to the Exercises*. World Scientific.
- Chou, J.C.K., 1992. Quaternion Kinematic and Dynamic Differential Equations. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 8(1), pp.53-64.

- Craig, J.J., 1988. *Adaptive Control of Mechanical Manipulators*. Addison Wesley.
- Craig, J.J., 2005. *Introduction to Robotics Mechanics and Control*. Pearson Prentice Hall.
- Farin, G.E. & Hansford, D., 2000. *The Essentials of CAGD*. A K Peaters.
- Fu, K.S. Gonzalez, R.C. & Lee, C.S.G., 1987. *Robotics control, Sensing, Vision, and Intelligence*. McGraw Hill.
- Goldstein, H. Poole, C.P. & Safko, J.L., 2002. *Classical Mechanics*. Addison Wesley.
- Harmer, A., 2003. *Adaptive Control of a RRR-Manipulator*. Internal Traineeship Report, DCT 2003.68, Technische Universiteit Eindhoven.
- Kim, S.H., 2007. *A Study on Dynamic Modeling and Trajectory Control of Hydraulic Excavator*. M.Sc. Seoul National University.
- Ku, N.K. et al., 2010. Development of a Mobile Welding Robot for Double Hull Structure in Shipbuilding. *Journal of Marine Science and Technology*, 15(4), pp.374–385.
- Kwon, J.H., 2008. *Dynamic Simulation and Experimental Study of Impedance Control for Roboticorthosis to Assist Overhead Operation in Shipbuilding Process*. M.Sc. Seoul National University.
- Lewis, F.L. Dawson, D.M. & Abdallah, C.T., 2004. *Robot Manipulator Control*. Marcel Dekker.
- Murray, R.M. Li, Z. & Sastry, S.S., 1994. *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*. CRC Press.
- Niku, S.B., 2001. *Introduction to Robotics Analysis, Systems, Applications*. Prentice Hall.
- Park, J.Y. & Lee, Y.G., 2009. A Study on the Determination of Cutting Work Envelope of Articular Robot for H-beam Cutting. *Transactions of the Korean Welding and Joining Society*, 27(6), pp.55–61.
- Spong, M.W. & Vidyasagar, M., 1989. *Robot Dynamics and Control*. John Wiley & Son.
- Spong, M.W. Hutchinson, S. & Vidyasagar, M., 2006. *Robot Modeling and Control*. John Wiley & Son.

