

CNC 선반용 4축 전용로봇의 모델링 및 시뮬레이션

김한솔*, 김갑순*[#]

*경상대학교 제어계측공학과

Modeling and Simulation of 4-Axis Dedicated Robot for CNC Lathe

Han-Sol Kim*, Gab-Soon Kim*[#]

*Department of Control & Instrumentation Engineering(ERI), Gyeongsang National Univ.

(Received 22 January 2021; received in revised form 29 January 2021; accepted 04 February 2021)

ABSTRACT

This paper describes the modeling and simulation of a four-axis dedicated robot that can attach and detach a workpiece on a computer numerical control (CNC) lathe. The robot was modeled as a Scarab robot for compatibility with CNC lathes. The advantages of such a robot are that an actuator with a small capacity can be used for the robot and the degrees of freedom of the robot can be reduced to four. For the simulation of the four-axis dedicated robot, a regular kinematic equation and an inverse kinematic equation were derived. Simulations were performed with these equations from the position of the loading device to the chuck position of the lathe before machining and from the chuck of the lathe to the position of the loading device after machining. The simulation results showed that the four-axis dedicated robot could be operated accurately, and they provided the joint angle of each motor (θ_1 , θ_2 , and θ_3).

Key Words : 4-axis Dedicated Robot(4축 전용로봇), Simulation(시뮬레이션), CNC Lathe(CNC 선반), Joint Angle(관절각), Link(링크)

1. 서 론

CNC 선반을 이용하여 공작물을 가공하기 위해서는 로봇 등을 이용하여 가공 전 공작물을 선반의 척에 장착하고, 가공 후 공작물을 탈착해야 한다. 공작물의 장착과 탈착은 6축 산업용 로봇을

이용하는 방법^[1-7], 젠츄리 로봇을 이용하는 방법^[8-10] 등이 있다.

6축 산업용 로봇을 이용하는 방법은 일반적으로 많이 사용하고 있고, 위치를 결정하는 3개의 관절과 방위를 결정하는 3개의 관절이 있어 CNC 선반에 공작물을 장착과 탈착하는데 유용하게 사용되고 있으나 총 6개의 관절을 가지고 있으므로 가격이 고가이고, 설치면적이 큰 단점이 있다. 젠츄리 로봇을 이용하는 방법은 각 CNC 선반의 상

Corresponding Author : gskim@gnu.ac.kr

Tel: +82-55-772-1745, Fax: +82-55-772-1749

부에 개별적으로 설치하는 것과 여러 대의 선반에 하나의 로봇을 설치하는 것으로 분류되고, 이것은 선반에 진동이 발생하는 등의 단점을 가지고 있다. 또한, 스칼라 로봇은 말단 부분이 부피가 크기 때문에 CNC 선반의 공작물 장착과 탈착을 위해 사용하기가 어렵다. 그러므로 효율적으로 CNC 선반의 공작물 장착과 탈착을 수행하기 위한 새로운 형태의 로봇개발이 필요하다.

본 논문에서는 CNC 선반에 공작물의 장착과 탈착을 원활하게 수행할 수 있도록 스칼라 로봇을 변형하여 4축 전용로봇을 모델링하였다. 4축 전용로봇의 정기구학식과 역기구학식을 유도하였고, 유도한 식을 이용하여 가공 전 공작물 적재장치 위치로부터 CNC 선반의 척 위치까지, 그리고 CNC 선반의 척 위치부터 가공 후 공작물 적재장치의 위치까지 이동하는 시뮬레이션을 실시하였다.

2. 4축 전용 로봇의 모델링 및 시뮬레이션

2.1 4축 전용로봇의 개념

본 논문에서는 CNC 선반에 공작물을 장착하고 탈착할 수 있는 스칼라 로봇형태의 4축 전용로봇을 모델링하였다. Fig. 1은 새롭게 모델링한 4축 전용로봇의 구조를 나타내고 있고, 이 로봇은 스칼라 로봇의 형태로 모델링되어 있으므로 관절1 모터와 관절2 모터가 축방향으로 일정한 거리가 떨어져 있으며, 관절2 모터와 관절3 모터는 수평 방향으로 동일 선상으로 일치한다. 그리고 관절4는 공기압으로 90° 회전하여 수평 그리퍼와 수직 그리퍼가 서로 위치를 바꾼다. 이와 같이 4축 전용로봇을 모델링한 것은 각 관절의 모터가 수평으로 회전하기 때문에 적은 용량의 각 관절모터를 사용할 수 있는 장점이 있다. 로봇은 관절1, 2, 3 모터, 링크1, 2, 엘보우1, 2, 그리퍼 등으로 구성되어 있고, 로봇의 각 부품은 수평 그리퍼와 수직 그리퍼에 공작물이 고정되어 있을 때, 공작물의 중심 끝점의 처짐이 CNC 선반의 척과 적재장치에 적재할 수 있고 안전하도록 설계되어야 한다.

Fig. 2는 CNC 선반용 4축 전용로봇의 사용원리를 나타내고 있고, 이것은 CNC 선반의 평면 개략

도, 4축 전용로봇, 그리퍼, 적재장치 등으로 구성된다. CNC 선반의 평면 개략도는 선반이 공작물을 가공하기 위해 공작물을 고정하는 척의 위치를 나타내고 있다. 4축 전용로봇이 이 척에 공작물을 장착하고 탈착한다. 4축 전용로봇(4-axis robot)은 3개의 관절모터로 구성되어 있고, 이것들이 동시에 동작되어 그리퍼로 잡은 공작물의 중심선이 선반 척의 중심선을 따라 이동하도록 제어되어야 한다. 그리퍼는 공작물 2개를 수평과 수직으로 잡을 수 있도록 90° 각도로 수평 그리퍼와 수직 그리퍼가 고정되어 있고, 공기압으로 90° 회전할 수 있으며, 90° 회전하면 수평의 공작물과 수직의 공작물이 각각 수직과 수평으로 바뀐다.

적재장치(stocker)는 가공 전 공작물을 적재하는 가공 전 적재장치와 가공 후 공작물을 적재하는 가공 후 적재장치로 구분된다.

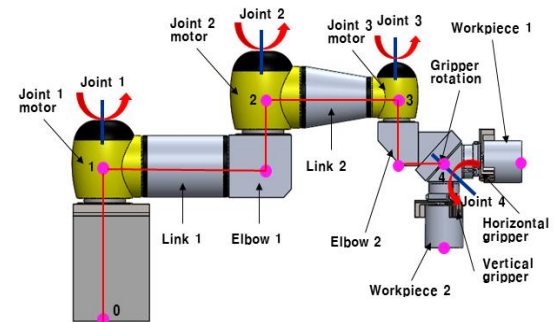


Fig. 1 Structure of 4-axis dedicated robot

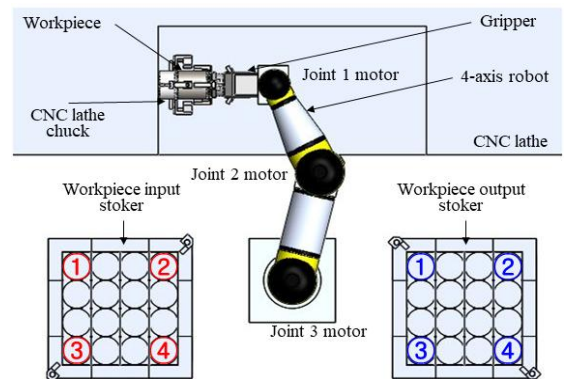


Fig. 2 Use principle of 4-axis dedicated robot for CNC lathe

4축 전용로봇의 동작은 가공전 적재장치에 적재해 있는 가공 전 공작물을 수직 그리퍼로 잡은 후 척 위치로 이동하고, 선반의 척에 고정되어 있는 가공 후 공작물을 수평 그리퍼로 탈착하며, 그리퍼를 90° 회전한 후 가공 전 공작물의 척에 장착한다. 그리고 그리퍼를 90° 회전한 후 가공 후 적재장치로 이동하여 가공 후 공작물을 적재한다. 4축 전용로봇을 제어하기 위해서는 정기구학식과 역기구학식을 유도해야 하고, 시뮬레이션을 통해 로봇이 공작물을 CNC 척에 장탈착과 적재장치에 적재가 가능한지를 확인해야 한다.

2.2 4축 전용로봇의 기구학 해석

본 논문에서 모델링한 4축 전용로봇을 이용하여 CNC 선반의 척에 공작물을 정확하게 장착과 탈착하기 위해서는 정기구학식을 유도해야 하고, 유도한 정기구학식을 이용하여 각 관절의 회전각인 역기구학식을 유도해야 한다. 먼저 정기구학식을 유도하기 위한 좌표계 $i-1$ 을 기준으로 좌표계 i 의 동차변환행렬식은 다음 식과 같이 쓸 수 있다.

$${}^{i-1}T = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} - s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} d_i & -s\alpha_{i-1} d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & r \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, a_{i-1} 는 링크의 길이이고 x_{i-1} 축을 따라서 측정된 z_{i-1} 축과 z_i 축 사이의 거리, α_{i-1} 는 링크의 뒤틀림각이고 x_{i-1} 축을 중심으로 측정된 z_{i-1} 축과 z_i 축 사이의 각도, d_i 는 링크의 오프셋이고 z_i 축을 따라서 측정된 x_{i-1} 축과 x_i 축 사이의 거리, θ_i 는 관절각이고 z_i 축을 중심으로 측정된 x_{i-1} 축과 x_i 축 사이의 각도, R은 방위, r은 위치이다.

Fig. 3은 기구학 해석을 위한 4축 전용로봇의 개략도를 나타내고 있고, (a)는 정면도, (b)는 평면

도를 나타내고 있으며, 관절 0을 기준좌표로 설정하고 관절 1, 2, 3, 4를 각 관절좌표로 설정한다. 관절 1, 2, 3의 각 관절각을 각각 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 이고, 각 링크의 길이를 각각 a_1, a_2, a_3 이며, 링크의 오프셋은 각각 $d_1, d_2, -d_4$ 이다.

Table 1은 4축 전용로봇의 D-H 링크인자(Denavit-Hartenberg parameters)를 나타내고 있고, 이것은 동차변환행렬식을 구할 때 이용된다. 기준좌표계 0을 기준으로 좌표계 4의 동차변환행렬식은 Table 1의 D-H 파라미터값을 식 (1)에 대입하여 구하면 다음 식과 같이 쓸 수 있다.

$${}^0_4T = \begin{bmatrix} c_{123} - s_{123} 0 & a_1 c_1 + a_2 c_{12} + a_3 c_{123} \\ s_{123} & c_{123} & 0 & a_1 s_1 + a_2 s_{12} + a_3 s_{123} \\ 0 & 0 & 1 & d_1 + d_2 - d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서, c_{123} 는 $\cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$ 이고, s_{123} 는 $\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$ 이다.

그리고 기준좌표계의 x_0 을 기준으로 공작물의 중심축인 x_4 사이의 각을 ϕ 라하면 식 (2)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

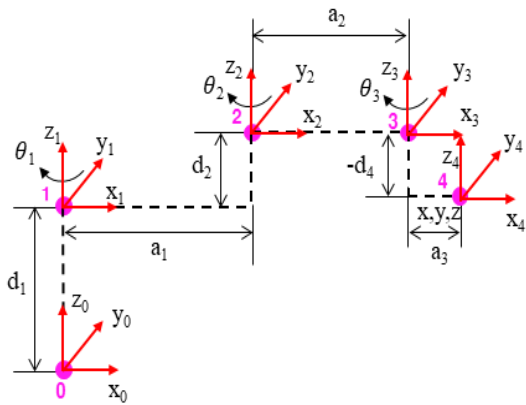
$$\begin{bmatrix} c_{123} - s_{123} 0 & a_1 c_1 + a_2 c_{12} + a_3 c_{123} \\ s_{123} & c_{123} & 0 & a_1 s_1 + a_2 s_{12} + a_3 s_{123} \\ 0 & 0 & 1 & d_1 + d_2 - d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\phi - s\phi 0 & x \\ s\phi & c\phi & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

식 (3)로부터 정기구학식은 다음과 같다.

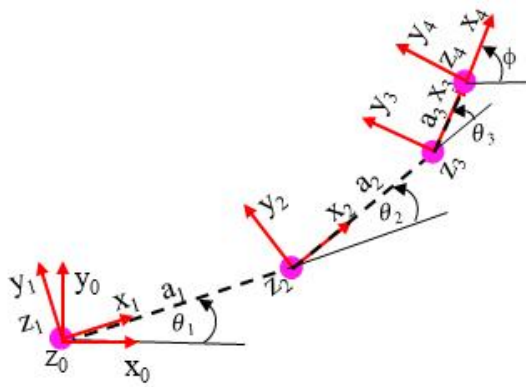
$$\begin{aligned} x &= a_1 c_1 + a_2 c_{12} + a_3 c_{123} \\ y &= a_1 s_1 + a_2 s_{12} + a_3 s_{123} \\ z &= d_1 + d_2 - d_4 \end{aligned} \quad (4)$$

기준좌표계의 x_0 을 기준으로 공작물의 중심축인 x_4 사이의 각을 ϕ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\phi = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \quad (4)$$



(a) Front view



(b) Top view

Fig. 3 Schematic diagram of a 4-axis dedicated robot for kinematic analysis

Table 1 D-H parameters of 4-axis dedicated robot

Joint(i)	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0°	0	d_1	θ_1
2	0°	a_1	d_2	θ_2
3	0°	a_2	0	θ_3
4	0°	a_3	$-d_4$	0°

각 관절의 모터의 회전각을 구하기 위한 역기

학식인 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 를 유도해야 한다. 식 (4)를 이용하여 관절3의 회전각 θ_3 를 구하는 식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\theta_3 = \phi - (\theta_1 + \theta_2) \quad (5)$$

관절2의 회전각 θ_2 을 구하는 식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\theta_2 = \text{atan2}(s_2, c_2) \quad (6)$$

여기서, c_2 와 s_2 를 구하는 식은 다음과 같다.

$$c_2 = \frac{(x + a_3 c_{123})^2 + (y + a_3 s_{123})^2 - a_1^2 - a_2^2}{a_1 a_2}$$

$$s_2 = \pm \sqrt{1 - c_2^2} \quad (7)$$

관절2의 회전각 θ_1 을 구하는 식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\theta_1 = \text{atan2}(s_1, c_1) \quad (8)$$

여기서, c_1 와 s_1 를 구하는 식은 다음과 같다.

$$c_1 = \frac{(a_1 + a_2 c_2 - a_3 c_{23})x + (a_2 s_2 + a_3 s_{23})y}{(a_1 + a_2 c_2 + a_3 c_{23})^2 + (a_2 s_2 - a_3 s_{23})^2} \quad (9)$$

$$s_1 = \frac{-(a_2 s_2 + a_3 s_{23})x + (a_1 + a_2 c_2 - a_3 c_{23})y}{(a_1 + a_2 c_2 - a_3 c_{23})^2 + (a_2 s_2 + a_3 s_{23})^2}$$

2.3 4축 전용로봇의 시뮬레이션

Fig. 4는 시뮬레이션을 위한 4축 전용로봇의 위치를 나타내고 있고, 이것은 가공 전 공작물 적재 위치, 척의 공작물 장탈착위치, 가공 후 공작물 적재 위치를 나타낸다.

4축 전용로봇이 CNC 선반에 사용되기 위해서는 첫째, 로봇의 수직 그리퍼가 가공 전 공작물 적재 장치“①”로부터 공작물을 잡고, 둘째, 선반의 척의 위치“C”까지 이동하여 수평 그리퍼로 가공 후 공

작물을 탈착하고 수직그리퍼를 수평으로 위치하도록 90° 회전시켜 가공 전 공작물을 장착하며, 셋째, 가공 후 공작물을 가공 후 공작물 적재장치 “⑤”에 적재를 원활하게 수행해야 한다. 시뮬레이션을 위해 4축 전용로봇의 크기인 링크길이, 링크 오프셋거리 등을 로봇의 기준위치부터 CNC 선반의 척 위치까지의 거리와 가공 전 적재장치와 가공 후 적재장치까지의 거리 등을 고려하여 결정하였다. Fig. 3에서 나타낸 링크의 길이는 a_1 이 421 mm, a_2 가 344 mm, a_3 가 110 mm, 링크 오프셋거리는 d_1 이 1052 mm, d_2 가 153 mm, d_4 가 138 mm로 각각 결정하였다. 시뮬레이션을 수행하기 위해서, 본 논문에서 유도한 정기구학식 (4)과 역기구학식 (5), (6), (8)에 링크의 길이, 오프셋거리 등을 입력하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 첫째, 가공 전 공작물 적재장치의 각 위치 ①, ④에서 선반 척 위치“C”까지 이동, 둘째, 척 위치“C”로부터 가공 후 공작물 적재장치 각 위치 ⑤, ⑧까지의 이동하는 모습을 실시하였다.

Fig. 5는 가공 전 적재장치 위치 ①로부터 척 위치까지의 시뮬레이션 결과를 나타내고 있고, (a)는 위치 ①에서의 각 관절 회전각 $\theta_1 = 60^\circ$, $\theta_2 = 55^\circ$, $\theta_3 = -5^\circ$ 와 각 링크의 길이 $a_1 = 421$ mm, $a_2 = 344$ mm, $a_3 = 110$ mm 등을 정기구학식 (4)에 입력하여 말단장치의 회전각과 위치는 각각 $\phi = 110^\circ$, $x = 27.5$ mm, $y = 779.7$ mm, $z = 1067.0$ mm를 얻었다. 이 값들을 역기구학식 (5), (6), (8)에 대입하여 얻은 결과는 정기구학식에 입력한 말단장치의 회전각이 각각 동일하였다. (b)는 척 위치에서 각 관절 회전각 $\theta_1 = -20^\circ$, $\theta_2 = 40^\circ$, $\theta_3 = 70^\circ$ 와 각 링크의 길이들을 정기구학식에 입력한 결과, 회전각과 위치는 각각 $\phi = 90^\circ$, $x = 718.9$ mm, $y = 83.55$ mm, $z = 1067.0$ mm를 얻었다. 이 값들을 역기구학식 (5), (6), (8)에 대입하여 얻은 결과는 정기구학에 입력한 말단장치의 회전각이 각각 동일하였다. 그리고 (c)는 가공 전 적재장치 위치 ①로부터 척 위치까지의 시뮬레이션 결과를 나타내고 있고, 정확하게 이동되는 것을 확인할 수 있었다.

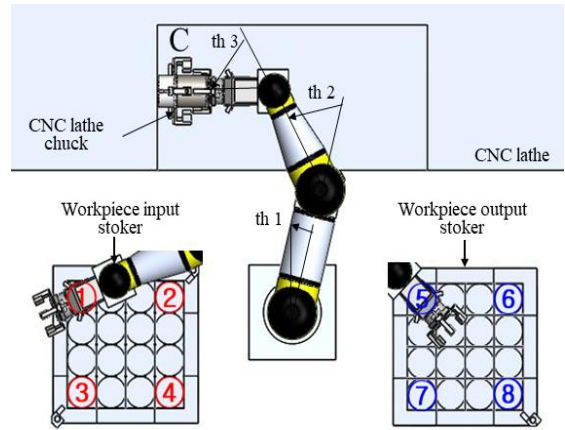
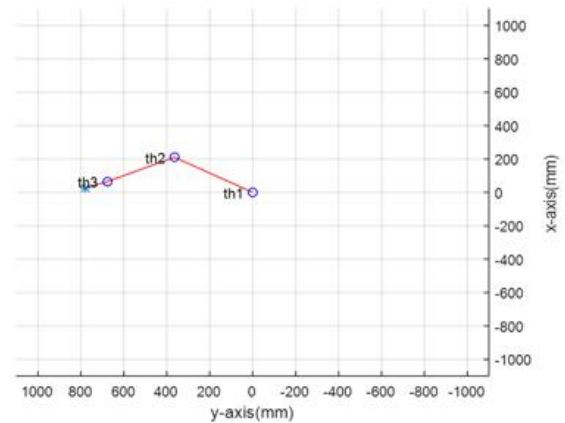
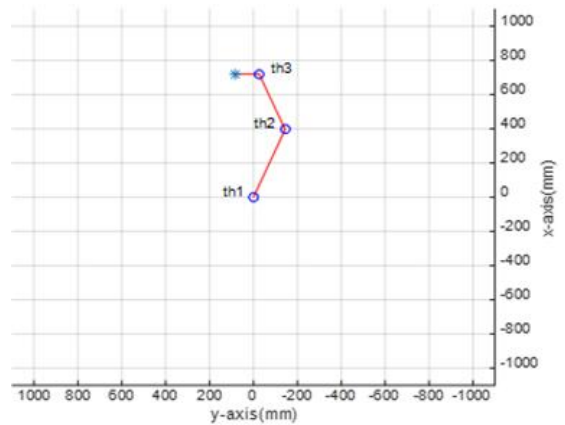


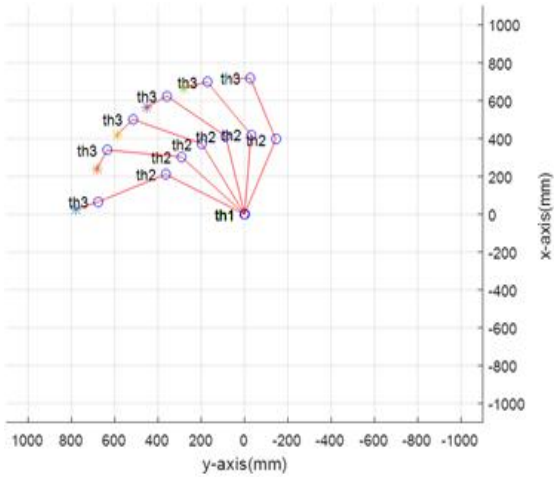
Fig. 4 Position of 4-axis dedicated robot for simulation



(a) Direct and inverse kinematics at position ①



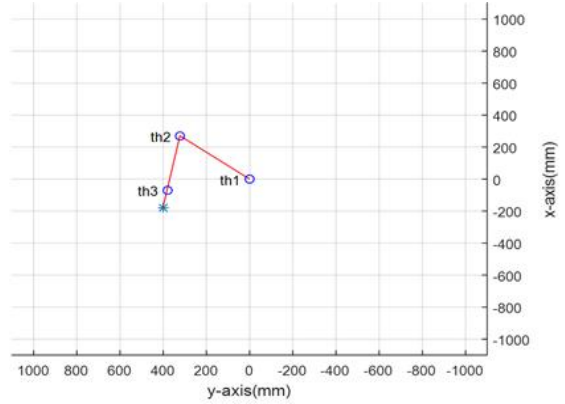
(b) Direct and inverse kinematics at chuck position



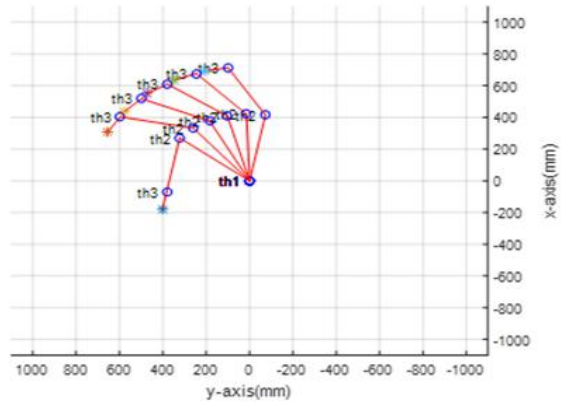
(c) Motion simulation

Fig. 5 Simulation result from stoking device position ④ to chuck position before machining

Fig. 6은 가공 전 적재장치 위치 ④로부터 척 위치까지의 시뮬레이션 결과를 나타내고 있고, (a)는 위치 ④에서의 각 관절 회전각 $\theta_1 = 50^\circ$, $\theta_2 = 120^\circ$, $\theta_3 = 0^\circ$ 와 각 링크의 길이를 정기학식 (4)에 입력한 결과, $\phi = 170^\circ$, $x = -175.5$ mm, $y = 401.3$ mm, $z = 1067.0$ mm를 얻었다. 이 값들을 역기구학식 (5), (6), (8)에 대입하여 얻은 결과는 정기구학식에 입력한 말단장치의 회전각이 각각 동일하였다. (b)는 가공 전 적재장치 위치 ④로부터 척 위치까지의 시뮬레이션 결과를 나타내고 있고, 정확하게 이동되는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 6은 가공 전 적재장치 위치 ④로부터 척 위치까지의 시뮬레이션 결과를 나타내고 있고, (a)는 위치 ④에서의 각 관절 회전각 $\theta_1 = 50^\circ$, $\theta_2 = 120^\circ$, $\theta_3 = 0^\circ$ 와 각 링크의 길이를 정기학식 (4)에 입력한 결과, $\phi = 170^\circ$, $x = -175.5$ mm, $y = 401.3$ mm, $z = 1067.0$ mm를 얻었다. 이 값들을 역기구학식 (5), (6), (8)에 대입하여 얻은 결과는 정기구학식에 입력한 말단장치의 회전각이 각각 동일하였다. (b)는 가공 전 적재장치 위치 ④로부터 척 위치까지의 시뮬레이션 결과를 나타내고 있고, 정확하게 이동되는 것을 확인할 수 있었다.



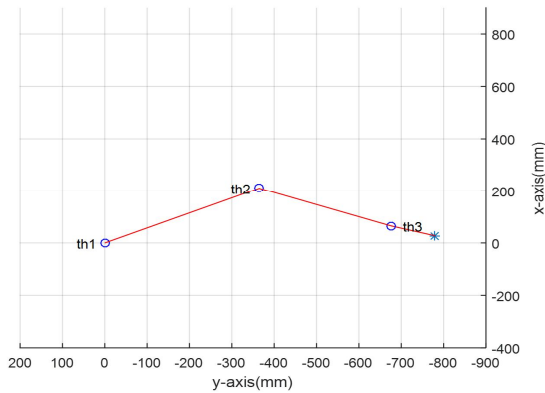
(a) Direct and inverse kinematics at position ④



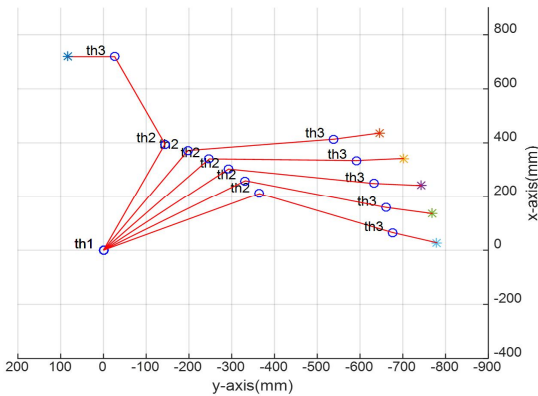
(b) Motion simulation

Fig. 6 Simulation result from stoking device position ④ to chuck position before machining

Fig. 7는 척의 위치로부터 가공 후 적재장치 위치 ⑥까지의 시뮬레이션 결과를 나타내고 있고, (a)는 위치 ⑥에서의 각 관절 회전각 $\theta_1 = -60^\circ$, $\theta_2 = -55^\circ$, $\theta_3 = 5^\circ$ 와 각 링크의 길이를 정기학식 (4)에 입력한 결과, $\phi = -110^\circ$, $x = 27.5$ mm, $y = -779.7$ mm, $z = 1067.0$ mm를 얻었다. 이 값들을 역기구학식 (5), (6), (8)에 대입하여 얻은 결과는 정기구학식에 입력한 말단장치의 회전각이 각각 동일하였다. (b)는 척의 위치로부터 가공 후 적재장치 위치 ⑥까지의 시뮬레이션 결과를 나타내고 있고, 정확하게 이동되는 것을 확인할 수 있었다.

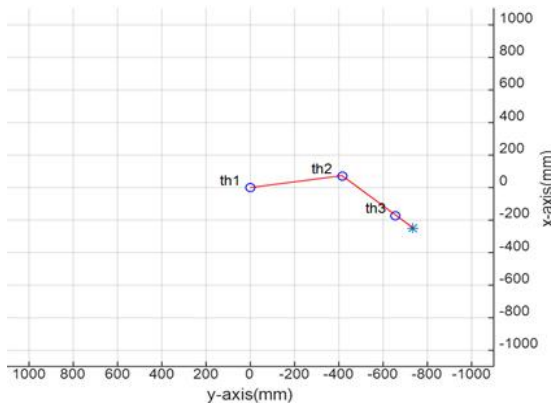


(a) Direct and inverse kinematics at position ⑥

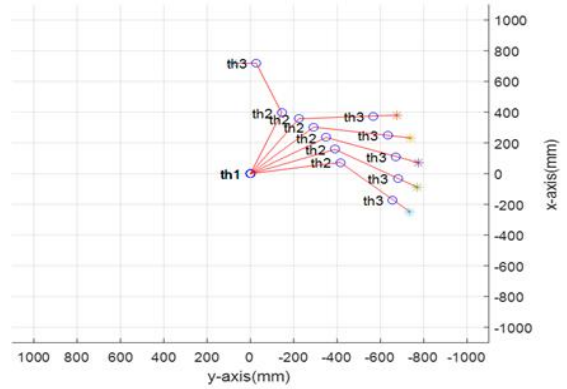


(b) Motion simulation

Fig. 7 Simulation result from the position of the chuck to the position of the loading device ⑥ after processing



(a) Direct and inverse kinematics at position ⑧



(b) Motion simulation

Fig. 8 Simulation result from the position of the chuck to the position of the loading device ⑧ after processing

Fig. 8은 척의 위치로부터 가공 후 적재장치 위치 ⑧까지의 시뮬레이션 결과를 나타내고 있고, (a)는 위치 ⑧에서의 각 관절 회전각 $\theta_1 = -80^\circ$, $\theta_2 = -55^\circ$, $\theta_3 = 0^\circ$ 와 각 링크의 길이를 정기학식 (4)에 입력한 결과, $\phi = -135^\circ$, $x = -247.9$ mm, $y = -735.6$ mm, $z = 1067.0$ mm를 얻었다. 이 값들을 역기구학식 (5), (6), (8)에 대입하여 얻은 결과는 정기구학식에 입력한 말단장치의 회전각이 각각 동일하였다. (b)는 척의 위치로부터 가공 후 적재장치 위치 ⑧까지의 시뮬레이션 결과를 나타내고 있고, 정확하게 이동되는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 5~8에서 나타낸 것과 같이 역기구학식으로부터 얻은 각 관절각 θ_1 , θ_2 , θ_3 는 로봇 그리퍼의 공작물의 위치가 가공 전 공작물 적재장치의 각 위치 ①, ④에서 선반 척 위치“C”까지 이동하고, 척 위치“C”로부터 가공 후 공작물 적재장치 각 위치 ⑤, ⑧까지의 이동할 때 사용된다.

3. 결 론

CNC 선반을 본 논문에서는 CNC 선반에 공작물을 장착과 탈착할 수 있는 4축 전용로봇을 모델링하고 시뮬레이션하였다. CNC 선반에 공작물을 장

착하고 탈착하기 적합한 스칼라 로봇 형태로 새로운 4축 전용 로봇을 모델링하였고, 이 4축 전용로봇을 시뮬레이션하기 위해 정기구학식과 역기구학식을 유도하였으며, 유도한 식들을 이용하여 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션한 결과, 새롭게 모델링된 4축 전용로봇은 가공 전 공작물 적재장치의 위치로부터 CNC 선반의 척의 위치까지 정확하게 동작됨을 확인하였고, 각 지점의 관절각 θ_1 , θ_2 , θ_3 를 구하였다. 그리고 CNC 선반의 척의 위치로부터 가공 후 공작물 적재장치의 위치까지도 정확하게 동작됨을 확인하였다. 따라서 본 연구에서 새롭게 모델링된 CNC 선반용 4축 전용로봇이 설계되고 제작되면, CNC 선반에서 가공 전 공작물과 가공 후 공작물을 장착 및 탈착하는데 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

추후 연구로는 CNC 선반용 4축 전용로봇을 설계 및 제작하고, 기본동작 특성실험을 실시하는 것이다.

후 기

“이 논문은 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지역신산업선도인력양성사업 성과임(No. 2016H1D5 A1909809).”

REFERENCES

1. Gu, J. S. and Silva, C. W., “Development and implementation of a real-time open-architecture control system for industrial robot systems,” *Intelligence*, Vol. 17, No. 5, pp. 469-483, 2004.
2. Sahu, S., Choudhury, B. B. and Biswal, B. B., “A Vibration Analysis of a 6 Axis Industrial Robot Using FEA,” *Materials Today: Proceedings*, Vol. 4, No. 2, Part A, pp. 2403-2410, 2017.
3. Zhang, Ji. and Cai, J., “Error Analysis and Compensation Method Of 6-axis Industrial Robot ,” *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, Vol. 6, No. 4, pp. 1383-1,99, 2013.
4. Wu, K., Krewe, C. and Kuhlenkötter, C., “Dynamic performance of industrial robot in corner path with CNC controller,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 54, pp. 156-161, 2018.
5. Pan, Z., Polden, J., Larkin, N., Van Duin, S. and Norrish, J., “Recent Progress on Programming Methods of Industrial Robots,” *Journal Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 28, No 2, pp. 87-94, 2012.
6. Watanabe, A., Sakakibara, S., Ban, K., Yamada, M., Shen, G. and Arai, T., “A Kinematic Calibration Method for Industrial Robots using Autonomous Visual Measurement,” *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 55, No. 1, pp. 1-6, 2006.
7. Shirinzadeh, B., Teoh, P., Tian, Y., Dalvand, M., Zhong, Y. and Liaw, H., “Laser Interferometry-Based Guidance Methodology for High Precision Positioning of Mechanisms and Robots,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 26, No. 1, pp. 74-82, 2010.
8. Ratcliffe, J. D., Lewin, P. L., Rogers, P. L., Hätönen, J. J. and Owens, D. H., “Norm-Optimal Iterative Learning Control Applied to Gantry Robots for Automation Applications,” *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS*, Vol. 22, No. 6, pp. 1303-1307, 2006.
9. Baicu, D. H., Rahn, C. D. and Dawson, C. D., “Backstepping Boundary Control of Flexible-Link Electrically Driven Gantry Robots,” *IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS*, Vol. 3, No. 1, pp. 60-66, 1998.
10. Baicu, C. F. and Rahn, C. D., “Active boundary control of a flexible single link gantry robot,” in *Proc. 13th IFAC World Congr.*, Vol. A, pp. 103-108, 1996.