

## 경량 델타로봇의 모델링 및 모션 제어

김성일\*, 홍준호\*, 신동원\*\*.#

\*금오공과 대학교 기계시스템공학과대학원, \*\*금오공과 대학교 기계시스템공학과

### Modeling and Motion-control for a Light-weight Delta Robot

Seong-Il Kim\*, Jun-Ho Hong\*, Dongwon Shin\*\*.#

\*Department of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology.

\*\*Department of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology.

(Received 7 February 2018; received in revised form 26 March 2018; accepted 2 April 2018)

#### ABSTRACT

Delta robots are usually used for industrial manufacturing, but heavy weight and expensive price have been obstacles to rapid propagation of robots in the field. The goal of this research is to make light-weight and price-competitive delta robots. To reduce the weight, we used plastic material for the arm link, and to reduce the price, we used a step-motor as the main actuator. First we formulated the equations of inverse kinematics for the designed delta robot and then verified these equations by using multibody-dynamics simulation. An algorithm of motion control was developed and applied to the motion-processing unit using a timer-interrupt of 8 milliseconds. Finally, we tested the performance of the new delta robot by checking its control of motion along line segments.

**Key Words** : Modeling(모델링), Delta Robot(델타로봇), Light-weight Robot(경량 로봇), Motion Control(모션 제어), Parallel Robot(병렬 로봇), RecurDyn(리커다인)

#### 1. 서 론

자동화 공정에 로봇의 활용은 지능화와 더불어 활발해지고 있는 가운데<sup>[1],[2]</sup> 최근 고속의 조립 자동화 및 3D프린터 등의 분야에 델타로봇을 이용한 기구들이 많이 사용되고 있다. 그로 인해 델타로봇에 대한 기구학적, 동역학적, 제어적 관점에서의 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>[3],[4],[5],[6]</sup>

하지만 델타로봇에 사용되는 고중량의 기구부와 서보 모터, 모터 드라이버, 모션 제어기 등의 고가의 가격 등의 문제로 더욱 활발한 기술개발

및 적용에 제한이 생기고 있다.

이와 같은 문제를 해결하기 위하여, 본 연구에서는 고속 운동에 적합한 경량 델타로봇을 모델링하여 제작하여 기존의 델타로봇에 비해 경량화 하였으며, 또한 모델링을 이용한 모션 시뮬레이션을 통하여 로봇 제어의 타당성을 확인하였다.<sup>[7],[8],[9],[10]</sup> 이어서 시뮬레이션으로 획득한 데이터를 통하여 모터 및 모터 드라이버를 선정하고, 선정된 모터와 저가형 제어보드를 이용하여 로봇의 모션 제어 소프트웨어를 개발하였다. 이를 바탕으로 경량 델타로봇을 제작하여 실험을 통하여 성능을 평가하였다.

본 논문은 2장에서 델타로봇의 모델링, 3장에서는 델타로봇의 제작 및 제어, 4장에서는 실험결과

# Corresponding Author : shindw@kumoh.ac.kr

Tel: +82-54-478-7321, Fax: 054-478-7100

를 설명하고, 마지막으로 결론에 대하여 언급한다.

## 2. 경량화 델타로봇 모델링

### 2.1 델타로봇의 모델링

델타로봇의 기본 구성 요소로는 플랫폼, 베이스, 크랭크, 링크 암, 유니버설 조인트(Universal joint) 등의 기구부로 구성된다.<sup>[11]</sup> 위 기구부들에 대해서 우선 기본적인 모델링이 필요함에 따라 CATIA를 이용하여 목표하고자 하는 형태로 최소한의 형태로 모델링을 진행하였다. 그에 대해서 그림 Fig. 1 에 표현 하였다. 이후 위 모델링을 토대로 기구학 시뮬레이션을 진행하였다.

### 2.2 델타로봇의 역기구학

우선 델타로봇의 플랫폼을 원하는 위치로 움직이기 위해서는 역기구학 방정식을 풀어야 한다. 이를 위하여 델타로봇의 형상과 관련된 파라미터들을 Fig. 2에 도시하였고, Table 1에 표시하였다.

플랫폼이 원하는 위치  $x, y, z$  로 움직이기 위한 모터의 각도를 얻기 위한 방정식을 구하기 위하여, 델타로봇에서 세 방향의 벡터 루프를 사용하여 폐쇄방정식을 구축함에 따라 식(1), (2), (3)을 유도하였다. 이 때 식에 나오는 벡터들은 식 (4)과 같고, 그림 Fig. 3 에 도시하였다.

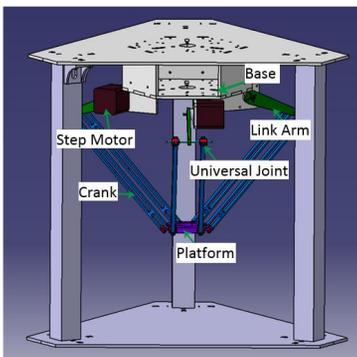


Fig. 1 Layout of Delta Robot

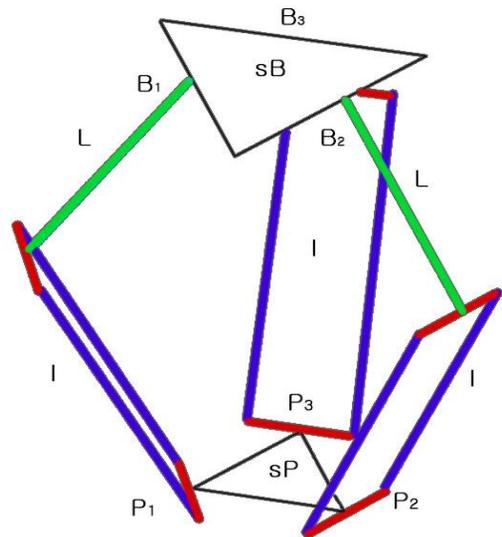


Fig. 2 Kinematic Diagram of Delta Robot

Table 1 Parameters of Delta Robot Configuration

Definition	Meaning
sB	An equilateral triangle with the base motor as the vertex
sP	Equilateral triangle of platform
uB	Length from the center to the vertex of the base
uP	Length from the center to the apex of the platform
wB	Length from the center to the edge of the base
wP	Length from the center to the edge of the platform
L	Link arm length
l	The length of the parallelogram of the crank

$$\{^B B_i\} + \{^B L_i\} + \{^B P_P\} + \begin{bmatrix} B \\ P \\ R \end{bmatrix} \{^P P_i\} = \{^B P_P\} + \{^P P_i\} \quad (1)$$

식(1)을 통하여 각각의 평행사변형의 중앙에 가상의 링크의 길이는 항상 일정하다는 가정 하에 식(2)와 식(3)의 방정식을 유도할 수 있다.

$$l_i = \|\{^B l_i\}\| = \|\{^B P_P\} + \{^B P_i\} - \{^B B_i\} - \{^B L_i\}\| \quad (2)$$

$$l_i^2 = \|\{^B l_i\}\|^2 = l_{ix}^2 + l_{iy}^2 + l_{iz}^2 \quad (3)$$

$${}^B B_1 = \begin{Bmatrix} 0 \\ -w_B \\ 0 \end{Bmatrix} \quad {}^B B_2 = \begin{Bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2}w_B \\ \frac{1}{2}w_B \\ 0 \end{Bmatrix} \quad {}^B B_3 = \begin{Bmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2}w_B \\ \frac{1}{2}w_B \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$${}^P P_1 = \begin{Bmatrix} 0 \\ -u_P \\ 0 \end{Bmatrix} \quad {}^P P_2 = \begin{Bmatrix} \frac{S_P}{2} \\ w_P \\ 0 \end{Bmatrix} \quad {}^P P_3 = \begin{Bmatrix} -\frac{S_P}{2} \\ w_P \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

$${}^B b_1 = \begin{Bmatrix} \frac{S_P}{2} \\ -w_B \\ 0 \end{Bmatrix} \quad {}^B b_2 = \begin{Bmatrix} 0 \\ u_B \\ 0 \end{Bmatrix} \quad {}^B b_3 = \begin{Bmatrix} -\frac{S_P}{2} \\ -w_B \\ 0 \end{Bmatrix}$$

where,

$$w_B = \frac{\sqrt{3}}{6} S_B \quad u_B = \frac{\sqrt{3}}{3} S_B \quad w_P = \frac{\sqrt{3}}{6} S_P$$

$$u_P = \frac{\sqrt{3}}{3} S_P$$

$$\begin{aligned} \{^B l_1\} &= \begin{Bmatrix} x \\ y + L \cos \theta_1 + a \\ z + L \sin \theta_1 \end{Bmatrix} \\ \{^B l_2\} &= \begin{Bmatrix} x - \frac{\sqrt{3}}{2} L \cos \theta_2 + b \\ y - \frac{1}{2} L \cos \theta_2 + c \\ z + L \sin \theta_2 \end{Bmatrix} \\ \{^B l_3\} &= \begin{Bmatrix} x + \frac{\sqrt{3}}{2} L \cos \theta_3 - b \\ y - \frac{1}{2} L \cos \theta_3 + c \\ z + L \sin \theta_3 \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

where,

$$a = w_B \quad b = \frac{S_P}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} w_B \quad c = w_P - \frac{1}{2} w_B$$

$$t_i = \frac{-F_i \pm \sqrt{E_i^2 + F_i^2 - G_i^2}}{G_i - E_i} \quad i = 1, 2, 3 \quad (6)$$

$$\theta_i = 2 \tan^{-1}(t_i) \quad (7)$$

식(2)에 식(4)의 파라미터와 목표위치(x, y, z)를 대입하면 식(5)와 같이 나타난다. 식(5)를 식(3)에 대입하면 sin과 cos에 대한 식으로 정리가 되는데, cos의 계수는 E<sub>i</sub>, sin의 계수는 F<sub>i</sub>, 나머지 상수는

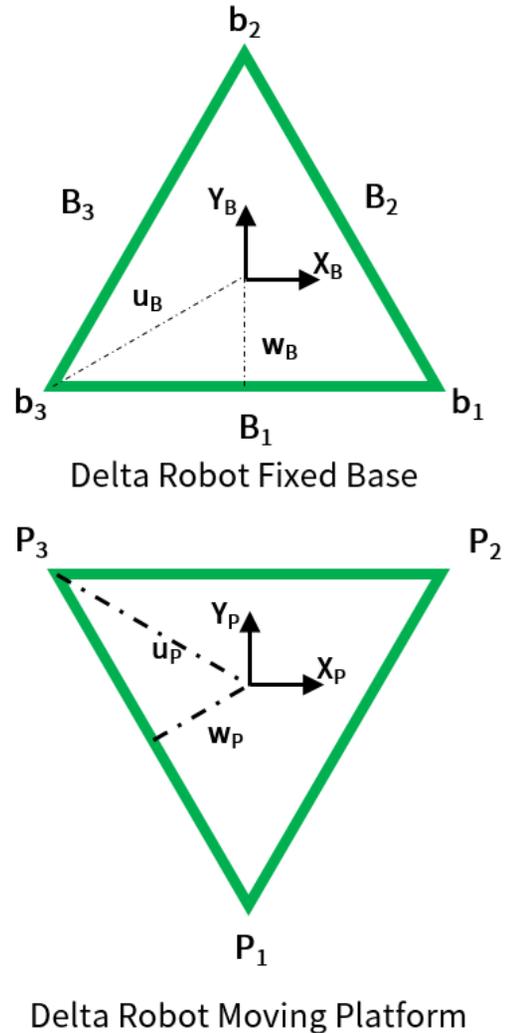


Fig. 3 Base and Platform of Delta Robot

$G_i$ 로 치환한다. 탄젠트 반각공식을 이용하여  $\cos$ 과  $\sin$ 을  $t_i$ 에 대하여 정리하면 이차 방정식이 생성되고 근의 공식을 이용하여 식(6)과 같이 해를 구할 수 있다. 식(7)와 같이 역탄젠트를 이용하여  $\theta_i$ 를 구한다.<sup>[11]</sup> 위 과정을 통하여 플랫폼의 위치 ( $x, y, z$ )에 대하여 링크 암의 각도( $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ )를 구할 수 있다.

### 2.3 델타로봇의 시뮬레이션

동역학 해석 프로그램인 리커다인(Recurdyn)을 이용하여 기구학적인 움직임을 시뮬레이션을 통하여 오류의 여부를 검토한 후에 하드웨어를 제작하는 과정으로 넘어간다. 모션 시뮬레이션에 대한 진행순서는 Fig. 4 에 도시하였다.

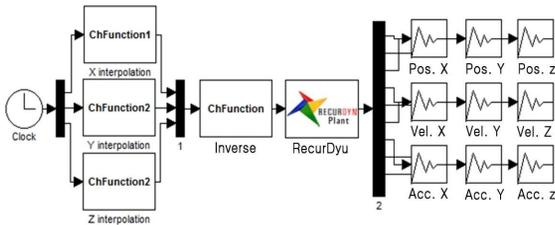


Fig. 4 Delta Robot Dynamics

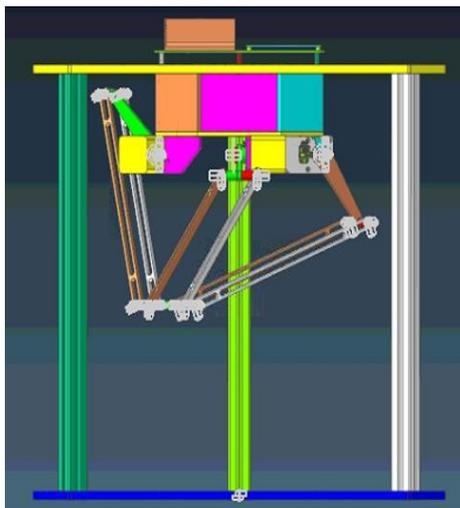


Fig. 5 Delta Robot Modeling

Fig. 4의 좌측에는 원하는  $x, y, z$ 가 입력되고, 이를 역기구학 식으로 풀어 실제 설계한 Fig. 5의 가상 기구에 입력하여  $x, y, z$ 의 움직임을 직선보간을 이용하여 구현하고 시간에 따른 플랫폼의 위치, 속도, 가속도, 구동 토크 값을 구하였다.

Fig. 6은  $x$ 축으로  $-100\text{mm}$ 만큼 작동시키는 상황을 시뮬레이션 하여 위치, 속도, 가속도 값을 시간에 따라 그래프로 도시화 하였다. 직선보간을 통해 속도를 가속, 등속, 감속 3부분으로 나누어 움직임을 변화시켰다. 0.5초까지는 일정한 가속도로 증가하며 속도가 증가하며 위치가 변화하고 0.5초부터 1초까지 등속부분으로 가속도가 0이 되면서 일정한 속도로 위치가 변한다. 마지막 1.5초까지는 감속부분으로 속도가 일정하게 감속하며 정지하게 된다. 그러므로 플랫폼의 위치 변화가 점진적으로 움직이면서 모션의 안정성을 확인할 수 있었다.

Fig. 7은 각각의 링크 암의 구동 토크 값을 도시화하였다. 여러 방향으로 Platform이 움직이면서 가

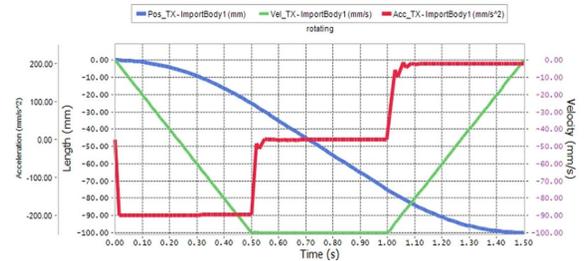


Fig. 6 Position, Velocity and Acceleration of Platform

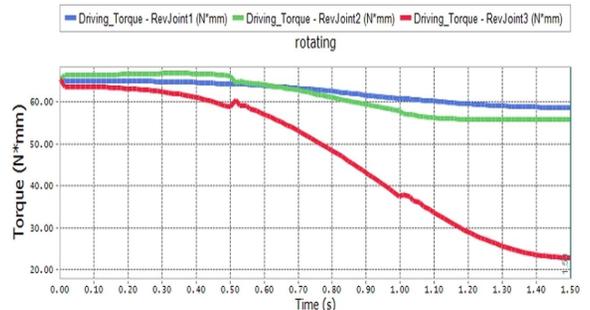


Fig. 7 Driving Torques of Link Arm

해지는 링크 압의 구동 토크 값을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다. 이 값을 통하여 구동하면서 발생하는 최대 토크 값을 확인하고 링크 압을 구동시키기 위한 모터를 선정하기 위한 근거로 사용하였다.

### 3. 델타로봇의 제작 및 제어

#### 3.1 델타로봇의 제작

실제 델타로봇을 제작할 때 경량 구조의 설계 개념과 가격의 저렴화를 목표로 제작하였다. 델타로봇의 안정성과 빠른 구동을 위한 구조로 설계를 하였으며, 최소한의 부품구성과 가벼운 플라스틱 소재를 선택하여 경량화를 시도하였다. Fig. 1의 Crank의 무게는 19g 플라스틱으로 알루미늄 소재로 한다면 42g으로 60% 가량의 무게감소 효과가 있다.

이후 모델링의 내구성과 구동범위의 타당성을 검증하였고 이후 실제 제작에 착수하였다. 델타로봇의 기본 구성 요소인 플랫폼, 베이스, 크랭크, 링크 압, 유니버설조인트 등의 기구부에서 크기와 무게를 줄이고자 링크 압 및 유니버설조인트 등의 재료를 플라스틱으로 선정하여 델타로봇의 경량화를 시도하였고, 모터는 고가의 서보모터 대신에 저렴한 가격의 스텝모터를 사용하였다. 선정한 스텝모터의 Stall 토크는 550[N·mm]로 Fig. 7의 최대 토크인 70[N·mm]보다 비교적 큰 여유를 두도록 하였다. 그 외에 연결부품 등에 대해서는 알루미늄으로 제작하였다. 제어부는 최근 현장에서 많이 사용되고 있는 ATMEGA 기반의 모터드라이버 일체형 보드를 사용하여 기존의 델타로봇의 제어부에 비하여 단순하게 구성하였다. 추가적으로 포토 센서를 연결하여 Fig. 8 과 같이 홈 센싱을 위한 센서 어셈블리를 구성하여 보다 정밀한 제어를 가능하도록 설계하였다. 제어기에 맞는 전원을 공급하기 위하여 SMPS (Switching Mode Power Supply)를 설치하였다. 이러한 제작을 통하여 델타로봇은 Fig. 9의 형태로 제작되었다.

#### 3.2 델타로봇의 제어

델타로봇의 모션 커널(Kernel) 제작하기 위해서 우선 제어 보드를 선정해야 한다. 우선 제어하기 편한 ATMEGA를 기반으로 제어 프로그램을 제작하였다. 그래서 ATMEGA MCU 칩을 기반으로 만들어진 RAMBO 1.4 보드를 선택하였다. 또한 제어 보드에는 스텝모터드라이버가 내장되어 있기 때문에 모션 커널에서는 모션 제어를 위한 경로, 모션 프로파일을 생성한다. 특히, 스텝핑 모터의 제어를 위하여, 정해진 주기의 펄스생성 알고리즘이 포함되어 있다. 모션 커널 프로그램의 작동 순서도를 Fig. 10에 도시하였다. 전체 프로그램은 Fig. 11과 같이 사용자 인터페이스와 통신을 지원하는 백그라운드(Background)와, 모션 제어를 수행하는 포어그라운드(Foreground)로 구성되었다. 포어그라운드는 모션 프로파일에 따른 구동과 펄스생성을 위하여 타이머기반으로 설계되었다. 사용자가 원하는 경로와 좌표를 입력하면, 현재 좌표를 시작으로 이동 경로를 생성하되, 최대속도와 가감속도로 구성된 모션 프로파일을 시간스케줄에 따라 이동좌표에 대한 펄스를 출력하게 되어 있다. 보드의 특성을 고려하여 타이머 인터럽트의 완성한 델타로봇의 실제 움직임과 시뮬레이션에 클럭(Clock) 속도를 8ms로 프로그래밍 하여 모션의 정밀도를 높이고자 하였다. 타이머 인터럽트를 통하여 델타로봇은 실시간 제어가 가능하게 되었으며 보다 정확한 주기로 제어가 가능하게 되었다.



Fig. 8 Motion Controller and Photo Sensor Assembly

#### 4. 실험결과

완성한 델타로봇의 실제 모션의 움직임과 시뮬레이션에서 나타난 결과를 비교하기 위해서 델타로봇 Control 플랫폼 중심을 기준으로 동작을 확인하였다. z축 구동과, (x, y) 구동의 두 가지 실험을 통하여 성능 확인을 진행하였다.

초기 포토센서에 의하여 검출되는 원점에 대한 플랫폼의 높이는 z축으로 -23cm이다. 첫 번째 실험에서는 x, y에 대한 좌표는 0으로 하고 z축만으로 구동하였다. 이에 좌표들은 (0, 0, -23)에서 (0, 0, -18)로 직선 구동시켰고, 이의 측정결과 2mm



Fig. 9 Photo of Delta Robot

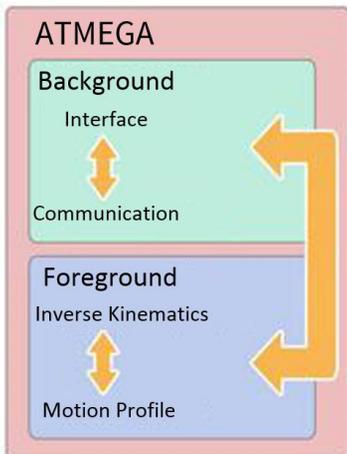


Fig. 11 Configuration of Delta Robot Software

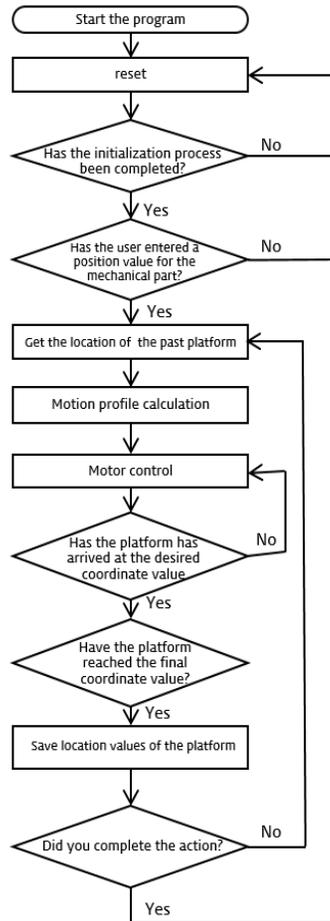


Fig. 10 Delta Robot Control Algorithm

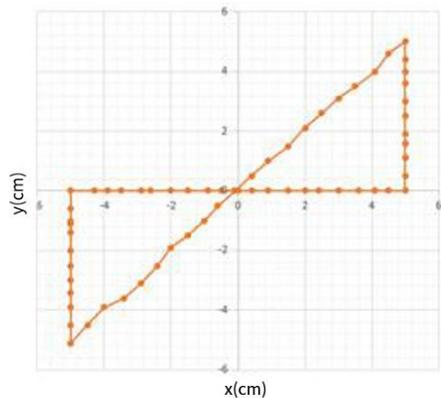


Fig. 12 Actual Line Segments by Motion

오차 내에서 구동이 됨을 알 수 있었다. 이러한 오차는 링크 압과 유니버설조인트가 플라스틱으로 설계되었기 때문에 발생한 것으로 추정된다. 두 번째 실험은 z축을 -18로 고정시키고, x축, y축 값을 변경하는 구동을 실시하였다. x축, y축 상의 최대 길이는 워크스페이스상에서 6.5cm이지만 여유를 고려하여 ±5.0cm로 구동을 하였다. 움직인 이동 구간에 대한 (x, y, z) 좌표는 다음과 같다.

(0, 0, -18) → (5, 0, -18) → (5, 5, -18)  
→ (-5, -5, -18) → (-5, 0, -18) → (0, 0, -18)

구동결과 Fig. 12와 같이 5개의 직선구간을 이동하였고, 각 구간마다 실제 동작한 좌표를 측정하여 여러 개의 점으로 도시하였다. 실제 위치 값과 목표 위치 값의 최대오차는 2mm로 나타나고 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 델타로봇의 역기구학식을 해석하였고 해석한 수식을 토대로 델타로봇의 모델링을 이용하여 동역학 해석 프로그램으로 모델링의 타당성을 확인하였다. 동역학 해석프로그램에서 사용한 모션 제어 코드를 실제의 제어기에 이식하여 사용함으로써 모델링과 제어기 구현의 연속성을 유지하였다. 델타로봇의 링크 재질을 플라스틱으로 선정하여 알루미늄 소재 대비하여 60% 가량의 무게 경량화를 하였고, 제어부는 ATMEGA를 이용한 제어 플랫폼으로 저렴하게 제작할 수 있도록 하였다. 또한 기존의 고가의 서보모터를 대신하여 스텝모터를 사용함으로써 인체 가격의 저렴화를 시도하였다. 모션 제어 커널에는 타이머 인터럽트를 기반으로 하는 모션 제어 커널을 설계하여 포어그라운드(Foreground)로 구성하였고, 사용자 인터페이스는 백그라운드(Background)로 분리하였다. 이때 구동되는 클럭 속도는 8ms로 일반 산업용 제어기보다는 느리지만, 중급 정도의 모션 제어가 가능하도록 하였다. 이렇게 완성된 기구부와 제어부를 장착한 델타로봇을 제작하였고, 경로 제어 실험을 통하여 타당성을 검증하였다.

## 후 기

“이 논문은 금오공과대학교학술연구비에 의하여 지원된 논문임.”

## REFERENCES

1. Kim, B. H., Kang, H. J., Seo, J. H., “A Study on the Optimal Design of a Robotic Welding System for a High-strength Steel Armor Plate,” *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 15, No. 5, pp. 31-38, 2016.
2. Chu, S. U., Jeong, S. H., “Structural and Dynamic Characteristic Analysis of a Feeder for an Automatic Assembly System of an LED Convergent Lighting Module,” *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 16, No. 1, pp. 124-133, 2017
3. Kim, H. S., “Dynamics Modeling and Control of a Delta High-speed Parallel Robot,” *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 13, No. 5, pp. 90-97, 2014.
4. Lee, J. D., “Study on the dynamic model of delta parallel robot with redundant actuation,” A Thesis for a master’s degree, Tongmyong University, Republic of Korea, 2013.
5. Sternheim, F., “Computation of the direct and inverse kinematic models of the Delta 4 parallel robot,” *Robotersysteme*, Vol. 3, No. 4, pp. 199-203, 1987.
6. Peter, V., Reymond, C., “Kinematic calibration of the parallel Delta robot,” *Robotica*, Vol. 16, pp. 207-218, 1998.
7. Do, H. M., Kim, B. I., Park, C. H., Kyung, J. H., “Synchronization Error-based Control Approach for an Industrial High-speed Parallel Robot,” *The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol. 25, No. 5, pp. 354-361, 2016.

8. Ha, S. M., "Development of a Parallel-kinematic Robot System for High-speed Applications," A Thesis for a master's degree, Kyungnam University, Republic of Korea, 2012.
9. Laribi, M. A., Romdhane, L., Zegloul, S., "Analysis and dimensional synthesis of the DELTA robot for a prescribed workspace," Mechanism and Machine Theory, Vol. 42, No. 7, pp. 859-870, 2007.
10. Liu, X. J., Wang. J., Zheng. H., "Workspace atlases for the computer aided design of the Delta robot", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 217, No.8, pp. 861-868, 2003.
11. Robert, L. W. II., "The Delta Parallel Robot: Kinematics Solutions," A Thesis for a Doctorate, Ohio University, United States of America, 2016.