

Delta 고속 병렬로봇의 동역학 모델링 및 제어

김한성[#]

(# 경남대학교 기계공학부)

Dynamics Modeling and Control of a Delta High-speed Parallel Robot

Han Sung Kim*

(Received 28 August 2014; received in revised form 7 October 2014; accepted 16 October 2014)

ABSTRACT

This paper presents a simplified dynamics model, dynamics simulations, and computed torque control experiments of the Delta high-speed parallel robot. Using the typical Newton-Euler method, a simplified but accurate dynamics model with practical assumptions is derived. Accuracy and fast calculations of the dynamics are essential in the computed torque control for high-speed applications. It was found that the simplified dynamics equation is in very good agreement with the ADAMS model, and the calculation time of the inverse kinematics and inverse dynamics is about 0.04 msec. From the dynamics simulations, the cycle trajectory along the y-axis requires less peak motor torque and a lower angular velocity and less power than that along the x-axis. The computed torque control scheme can reduce the position error by half as compared to a PD control scheme. Finally, the developed Delta parallel robot prototype, half the size of the ABB Flexpicker robot, can achieve a cycle time of 0.43 sec with a 1.0kg payload.

Key Words : Delta parallel robot(Delta 병렬로봇), Newton-Euler method(뉴턴-오일러 방법), Inverse dynamics analysis(역동역학 해석), Computed torque control(계산토크 제어), ADAMS(동역학 해석 S/W)

1. 서 론

Pick-and-place가 필요한 전자, 포장, 식품, 제약 등 많은 산업분야에서 3, 4자유도를 갖는 직교 또는 SCARA 직렬형 로봇이 많이 사용된다. 그러나 직렬구조의 비교적 큰 관성 및 중량 대비 작은 가반하중과 같은 단점을 극복하고자 최근 Delta 병렬로봇이 많은 관심을 받고 있다. 병렬 로봇은 비

교적 무거운 구동기가 고정부 또는 근처에 위치하고 가반하중이 여러 개의 다리로 분산이 되므로 고속, 고강성 및 고정밀도를 갖는다.

Delta 병렬로봇^[1]은 3자유도 병진운동(translational motion)과 1자유도 중앙 회전축으로 구성된 기구로 고속작업용으로 개발되어 현재는 SCARA 로봇을 대체하고 있다. Delta 병렬로봇의 중앙 회전축을 없애기 위하여 4개의 다리와 관절형 이동플랫폼(articulate traveling plate)으로 3자유도 병진운동과 1자유도 회전운동이 가능한 H4, 14 및 Par4도 제시되었다^[2]. 이러한 고속 병렬로봇은 관성력, 원심력 및 코리올리힘이 크게 변화하므로 계산토크제어(computed torque

Corresponding Author : School of Mechanical Engineering
of Kyungnam University

E-mail : hkim@kyungnam.ac.kr

control)가 필요하고 작업이 고속이므로 역동역학(inverse dynamics)의 빠른 계산이 필요하다. Lagrangian method, Hamilton's principle, Recursive method을 이용한 Delta 병렬로봇의 동역학 해석방법이 제시되었다^[3-6]. 또한 동역학 모델링을 통한 계산토크 제어 연구도 제시되었다^[7,8].

본 연구에서는 정밀도를 유지하면서 동역학 연산시간 최소화하기 위하여 다른 부품에 비하여 상대적으로 가벼운 2개의 연결링크의 질량이 연결링크의 양단에 각각 집중 분포되어 있다는 가정 및 Newton-Euler 식을 이용하여 간략화된 동역학식을 유도한다. 유도된 동역학식은 기존 직렬 로봇의 동역학식과 동일한 구조를 갖고 있어 Lagrangian 방법으로 유도된 병렬로봇의 동역학식^[4,6,9]에 비하여 계산토크 제어^[10]를 적용하기가 용이한 장점을 갖고 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 역기구학, 속도해석, 가속도해석 및 정역학 해석을 수행한다. 3장에서는 Newton-Euler 식을 이용하여 간략화된 동역학식을 유도한다. 4장에서는 간략화된 동역학식을 ADAMS 결과와 비교하고 시작품의 동적성능 시뮬레이션을 제시한다. 5장에서는 Delta 병렬로봇 시작품 설계결과 및 계산토크 제어 알고리즘을 이용한 제어실험결과를 제시한다.

2. 기구학 해석

Delta 병렬로봇은 Fig. 1과 같이 이동플랫폼을 3개의 R-Pa (Revolute-spatial Parallelogram) 다리로 지지하는 구조를 갖는다. 여기서 회전조인트가 구동된다. 각 평행사변형 기구가 평행사변을 이루는 평면에 수직인 방향으로 모멘트를 구속하므로 Delta 병렬로봇은 3개의 모멘트 구속조건을 갖고 3자유도 병진운동만이 가능한 기구이다. 특히, 평행사변형 기구를 이루는 2개의 S-S (Spherical-Spherical) 체인은 인장/압축력만 받으므로 강성이 매우 크고 작은 관성을 가지므로 Delta 병렬로봇은 고속작업에 적합하다. ABB사의 Flexpicker^[11]와 같은 상용 Delta 병렬로봇은 1자유도 중앙 회전축을 추가하여 SCARA 로봇과 같은 4자유도를 가지나 본 논문에서는 네 번째 회전축은 포함되지 않는다.

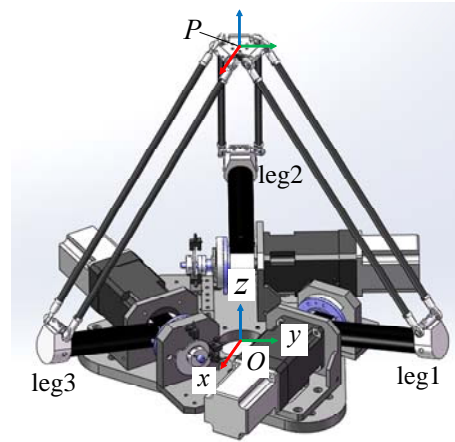


Fig. 1 Configuration of a Delta parallel robot

Fig. 1은 해석의 편의를 위하여 이동플랫폼을 위쪽으로 향하게 배치하였다. Fig. 2는 i 번째 다리의 벡터 루프 다이어그램을 나타낸다. 이 병렬로봇의 기구학적 변수인 a 와 b 는 고정 및 이동플랫폼의 반경을 나타내고, l_1 과 l_2 는 구동 및 연결링크의 길이를 나타낸다. θ_{1i} 는 구동조인트의 각도를 나타내고 θ_{2i} 와 θ_{3i} 는 수동조인트의 각도를 나타낸다. i 번째 다리의 벡터 루프 방정식은 다음과 같다.

$$\overline{A_i M_i} + \overline{M_i B_i} = \overline{OP} + \overline{PB_i} - \overline{OA_i} \quad (1)$$

수식유도를 위하여 Fig. 2와 같이 각 다리마다 지역 좌표계($A_i - x_i, y_i, z_i$)을 도입하고 벡터 루프 방정식을 i 번째 지역좌표계에서 표현하면 다음과 같다.

$$l_1 {}^i \mathbf{u}_{1i} + l_2 {}^i \mathbf{u}_{2i} = {}^i (\mathbf{p} + \mathbf{b} - \mathbf{a}) \quad (2)$$

여기서 선행 상첨자는 해당 벡터가 표현된 좌표계를 나타낸다. 식 (2)의 벡터들은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$${}^i \mathbf{u}_{1i} = \begin{bmatrix} c\theta_{1i} \\ 0 \\ s\theta_{1i} \end{bmatrix}, {}^i \mathbf{u}_{2i} = \begin{bmatrix} s\theta_{3i} c(\theta_{1i} + \theta_{2i}) \\ c\theta_{3i} \\ s\theta_{3i} s(\theta_{1i} + \theta_{2i}) \end{bmatrix}, \mathbf{p} = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix}$$

$${}^i\mathbf{b} = \begin{bmatrix} b \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, {}^i\mathbf{a} = \begin{bmatrix} a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, {}^i\mathbf{p} = R^T\mathbf{p}, R = \begin{bmatrix} c\phi_i - s\phi_i 0 \\ s\phi_i c\phi_i 0 \\ 0 0 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 $\phi_i = \pi/3, \phi_2 = \pi, \phi_3 = -\pi/3$ 이다(Fig. 3 참조).

첫 번째로, 역기구학은 이동플랫폼의 위치 \mathbf{p} 가 주어졌을 때, 구동조인트 θ_{1i} ($i=1,2,3$)를 구하는 문제이다. 식 (2)를 \mathbf{p} 에 대하여 풀이하면 수동조인트 각도(θ_{2i}, θ_{3i})는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\theta_{3i} = \cos^{-1} \frac{b_{2i}}{l_2}, \theta_{2i} = \cos^{-1} \kappa \quad (4)$$

여기서 $\kappa = (b_{1i}^2 + b_{2i}^2 + b_{3i}^2 - l_1^2 - l_2^2) / (2l_1 l_2 s\theta_{3i})$,

$b_{1i} = c\phi_i p_1 + s\phi_i p_2 + (b - a)$, $b_{2i} = -s\phi_i p_1 + c\phi_i p_2$,

$b_{3i} = p_3$ 이다. 구동조인트 각도(θ_{1i})는 다음과 같다.

$$\theta_{1i} = \text{Atan2}(-g_{2i}b_{1i} + g_{1i}b_{3i}, g_{1i}b_{1i} + g_{2i}b_{3i}) \quad (5)$$

여기서 $g_{1i} = l_1 + l_2 c\theta_{2i} s\theta_{3i}$, $g_{2i} = l_2 s\theta_{2i} s\theta_{3i}$ 이다.

두 번째로 이동플랫폼의 직선속도는 식 (2)를 시간에 대하여 미분하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$${}^i\dot{\mathbf{p}} = l_1 ({}^i\boldsymbol{\omega}_{1i} \times {}^i\mathbf{u}_{1i}) + l_2 ({}^i\boldsymbol{\omega}_{2i} \times {}^i\mathbf{u}_{2i}) + l_2 ({}^i\boldsymbol{\omega}_{3i} \times {}^i\mathbf{u}_{2i}) \quad (6)$$

여기서 ${}^i\boldsymbol{\omega}_{1i} = \dot{\theta}_{1i} [0, -1, 0]^T$, ${}^i\boldsymbol{\omega}_{2i} = (\dot{\theta}_{1i} + \dot{\theta}_{2i}) [0, -1, 0]^T$,

${}^i\boldsymbol{\omega}_{3i} = \dot{\theta}_{3i} [s(\theta_{1i} + \theta_{2i}), 0, -c(\theta_{1i} + \theta_{2i})]^T$ 이다. 수동조인트 각속도 $\boldsymbol{\omega}_{2i}, \boldsymbol{\omega}_{3i}$ 를 제거하기 위하여 식 (6)의 양변에 ${}^i\mathbf{u}_{2i}^T$ 를 곱하면,

$${}^i\mathbf{u}_{2i}^T R^T \dot{\mathbf{p}} = l_1 {}^i\boldsymbol{\omega}_{1i}^T ({}^i\mathbf{u}_{1i} \times {}^i\mathbf{u}_{2i}) \quad (7)$$

식 (7)을 $i=1,2,3$ 에 대하여 표현하면 다음과 같은 속도관계식을 얻을 수 있다.

$$J_x \dot{\mathbf{p}} = J_q \dot{\boldsymbol{\theta}} \quad \text{or} \quad \dot{\boldsymbol{\theta}} = J \dot{\mathbf{p}} \quad (8)$$

여기서 $\dot{\mathbf{p}} = [\dot{p}_1, \dot{p}_2, \dot{p}_3]^T$, $\dot{\boldsymbol{\theta}} = [\dot{\theta}_{11}, \dot{\theta}_{12}, \dot{\theta}_{13}]^T$,

$$J = J_q^{-1} J_x, J_q = l_1 \text{diag}(s\theta_{21}s\theta_{31}, s\theta_{22}s\theta_{32}, s\theta_{23}s\theta_{33}),$$

$$J_x = \begin{bmatrix} j_{1x} j_{1y} j_{1z} \\ j_{2x} j_{2y} j_{2z} \\ j_{3x} j_{3y} j_{3z} \end{bmatrix}, \begin{aligned} j_{ix} &= c(\theta_{1i} + \theta_{2i}) s\theta_{3i} c\phi_i - c\theta_{3i} s\phi_i, \\ j_{iy} &= c(\theta_{1i} + \theta_{2i}) s\theta_{3i} s\phi_i + c\theta_{3i} c\phi_i, \\ j_{iz} &= s(\theta_{1i} + \theta_{2i}) s\theta_{3i}. \end{aligned}$$

$\dot{\theta}_{1i}$ 가 결정되면, 식 (6)으로부터 2개의 수동조인트의 각속도를 다음과 같이 구할 수 있다.

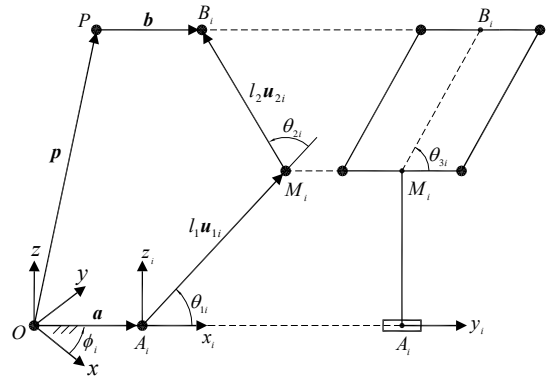
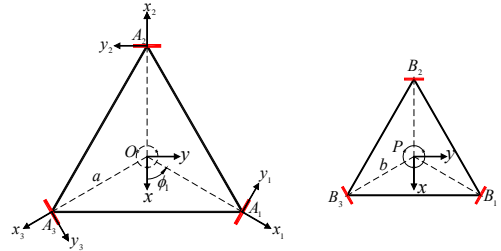


Fig. 2 Vector-loop diagram of the i^{th} leg



(a) Fixed frame and i^{th} local frame (b) Moving frame

Fig. 3 Frame definitions

$$\dot{\theta}_{3i} = -\dot{p}_2 / (l_2 s\theta_{3i}), \quad (9)$$

$$\dot{\theta}_{2i} = (-\dot{p}_1 c\theta_{1i} - \dot{p}_3 s\theta_{1i} + l_2 c\theta_{2i} c\theta_{3i} \dot{\theta}_{3i}) / (l_2 s\theta_{2i} s\theta_{3i}) - \dot{\theta}_{1i}$$

세 번째로 가속도 해석은 식 (8)을 시간에 대하여 미분함으로써 다음과 같이 구할 수 있다.

$$J_x \dot{\mathbf{p}} + J_x \ddot{\mathbf{p}} = J_q \dot{\boldsymbol{\theta}} + J_q \ddot{\boldsymbol{\theta}}, \quad \text{or} \quad \ddot{\boldsymbol{\theta}} = J_q^{-1} (J_x \dot{\mathbf{p}} + J_x \ddot{\mathbf{p}} - \dot{J}_q \dot{\boldsymbol{\theta}}) \quad (10)$$

여기서 $\ddot{\mathbf{p}} = [\ddot{p}_1, \ddot{p}_2, \ddot{p}_3]^T$, $\ddot{\boldsymbol{\theta}} = [\ddot{\theta}_{11}, \ddot{\theta}_{12}, \ddot{\theta}_{13}]^T$ 이다. \dot{J}_x 와 \dot{J}_q 는 J_x 및 J_q 의 시간에 대한 미분으로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{J}_x = \begin{bmatrix} \dot{J}_{1x} & \dot{J}_{1y} & \dot{J}_{1z} \\ \dot{J}_{2x} & \dot{J}_{2y} & \dot{J}_{2z} \\ \dot{J}_{3x} & \dot{J}_{3y} & \dot{J}_{3z} \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \dot{J}_{1x} &= -s(\theta_{11} + \theta_{21})(\dot{\theta}_{11} + \dot{\theta}_{21})s\theta_{31}c\phi_i + c(\theta_{11} + \theta_{21})\dot{\theta}_{31}c\theta_{31}c\phi_i + \dot{\theta}_{31}s\theta_{31}c\phi_i, \\ \dot{J}_{1y} &= -s(\theta_{11} + \theta_{21})(\dot{\theta}_{11} + \dot{\theta}_{21})s\theta_{31}s\phi_i + c(\theta_{11} + \theta_{21})\dot{\theta}_{31}c\theta_{31}s\phi_i - \dot{\theta}_{31}s\theta_{31}s\phi_i, \\ \dot{J}_{1z} &= c(\theta_{11} + \theta_{21})(\dot{\theta}_{11} + \dot{\theta}_{21})s\theta_{31} + s(\theta_{11} + \theta_{21})\dot{\theta}_{31}c\theta_{31}. \end{aligned}$$

$$\dot{J}_q = l_1 \text{diag}(\dot{J}_{q1}, \dot{J}_{q2}, \dot{J}_{q3}) \quad (12)$$

여기서 $\dot{J}_{qi} = \dot{\theta}_{2i}c\theta_{2i}s\theta_{3i} + \dot{\theta}_{3i}s\theta_{2i}c\theta_{3i}$ ($i = 1, 2, 3$)이다.

가상일의 원리(principle of virtual works)를 이용하여 엔드이펙터의 힘과 구동기 토크와의 정역학 관계를 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\mathbf{F} = J^T \boldsymbol{\tau} \quad (13)$$

여기서 $\mathbf{F} = [f_1, f_2, f_3]^T$ 는 엔드이펙터의 힘벡터를 나타내고 $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1, \tau_2, \tau_3]^T$ 는 구동기 토크벡터를 나타낸다.

3. 동역학 해석

Fig. 4는 Delta 병렬로봇의 동역학 모델링을 나타낸다. m_1 , m_2 , m_p 는 구동링크, 연결링크(1개 S-S 체인) 및 이동플랫폼의 질량을 나타내고 I_1 은 모터축에 대한 구동링크의 질량관성모멘트이다. 정밀도를 유지하면서 단순화된 동역학식을 유도하기 위하여 m_2 가 연결링크 양단에 집중된다는 가정을 사용한다.

각 모터축(y_i)에 대해 관성력에 의한 모멘트 합은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \Sigma M_{A1} \\ \Sigma M_{A2} \\ \Sigma M_{A3} \end{bmatrix} = I_A \ddot{\boldsymbol{\theta}} + (J^T)^{-1} (m_m \ddot{\mathbf{p}}) \quad (14)$$

여기서 γ 는 감속비이고 I_m 와 I_G 를 모터와 기어의 질량관성모멘트라고 할 때, $I_a = I_m + I_G$ 는 구동부의 질량관성모멘트이고 $I_A = \gamma^2 I_a + I_1 + m_2 l_1^2$ 가 되고 수식의 간략화를 위하여 $m_m = m_p + 3m_2$ 를 정의한다.

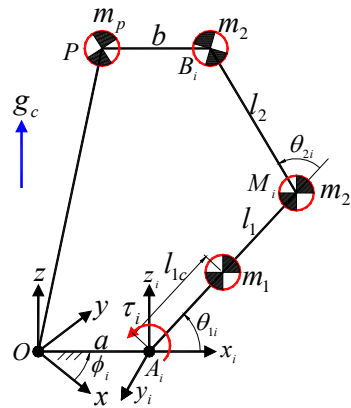


Fig. 4 Dynamics modeling of a Delta parallel robot

각 모터축(y_i)에 대해 모터의 토크, 중력 및 외부 힘($[f_1, f_2, f_3]^T$)에 의한 모멘트 합은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Sigma M_{A1} \\ \Sigma M_{A2} \\ \Sigma M_{A3} \end{bmatrix} = \boldsymbol{\tau} + (m_1 l_{1c} + m_2 l_1) g_c \mathbf{v}_1 + m_m (J^T)^{-1} \mathbf{v}_2 \quad (15)$$

여기서 $\mathbf{v}_1 = [c\theta_1, c\theta_2, c\theta_3]^T$, $\mathbf{v}_2 = [f_1, f_2, f_3 + g_c]^T$ 이다. 식 (14)와 식 (15)를 합하면 다음과 같은 동역학 방정식을 구할 수 있다.

$$\boldsymbol{\tau} = I_A \ddot{\boldsymbol{\theta}} + m_m (J^T)^{-1} \ddot{\mathbf{p}} - (m_1 l_{1c} + m_2 l_1) g_c \mathbf{v}_1 - m_m (J^T)^{-1} \mathbf{v}_2 \quad (16)$$

위 식에서 $\ddot{\mathbf{p}}$ 를 소거하기 위하여 식 (8)로부터 유도된 수식($\ddot{\mathbf{p}} = J^{-1}\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \frac{d}{dt}(J^{-1})\dot{\boldsymbol{\theta}}$)을 사용한다. 동역학 방정식을 벡터-행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\boldsymbol{\tau} = M(\boldsymbol{\theta})\ddot{\boldsymbol{\theta}} + C(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}})\dot{\boldsymbol{\theta}} + G(\boldsymbol{\theta}) \quad (17)$$

여기서 관성행렬, 원심력과 코리올리힘 관련 행렬 및 중력항은 다음과 같다.

$$M(\boldsymbol{\theta}) = I_A I_{3 \times 3} + m_m (J^T)^{-1} J^{-1} \quad (18)$$

$$C(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) = m_m (J^T)^{-1} \frac{d}{dt}(J^{-1}) \quad (19)$$

$$G(\boldsymbol{\theta}) = -(m_1 l_{1c} + m_2 l_1) g_c \mathbf{v}_1 - m_m (J^T)^{-1} \mathbf{v}_2 \quad (20)$$

여기서 $\frac{d}{dt}(J^{-1}) = -J_x^{-1} \dot{J}_x J_x^{-1} J_q + J_x^{-1} \dot{J}_q$ 이다.

역동역학 해석은 이동플랫폼의 궤적(trajjectory, \mathbf{p} , $\dot{\mathbf{p}}$, $\ddot{\mathbf{p}}$)이 주어졌을 때, 구동기 토크($\boldsymbol{\tau}$)를 계산하는 과정으로 다음과 같이 계산과정을 요약할 수 있다.

- $\theta_{3i}, \theta_{2i}, \theta_{1i}$: 역기구학(식 (4), (5))
- $\dot{\theta}_{1i}, \dot{\theta}_{3i}, \dot{\theta}_{2i}$: 속도해석(식 (8), (9))
- $\ddot{\boldsymbol{\theta}}$: 가속도해석(식 (10))
- $\boldsymbol{\tau}$: 구동기 토크 (식 (16) 또는 (17))

Lagrangian과 Newton-Euler 방법으로 유도된 동역학식 모두 동일한 계산 결과를 얻을 수 있고 비슷한 연산시간이 소요됨을 알 수 있다⁹⁾. 그러나 Newton-Euler 방법은 기존 직렬로봇의 동역학식과 같이 각 항을 분리하여 구할 수 있어 기존 직렬형 로봇에 적용된 제어방법을 사용할 수 있는 장점을 갖는다.

4. 동역학 시뮬레이션

본 장에서는 3장에서 유도된 동역학식과 ADAMS 시뮬레이션 결과를 비교하고 Delta 병렬로봇 시작품의

동적성능 시뮬레이션 결과를 제시한다. Table 1, 2, 3은 각각 병렬로봇 시작품의 기구학적 치수, 질량 특성값 및 선정된 구동기 규격을 나타낸다. 1kg 가반하중에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다.

먼저 직선궤적($-250 \rightarrow +250\text{mm}$, $v_{\max} = 7\text{m/s}$, $a_{\max} = 100\text{m/s}^2$)에 대하여 동역학식과 ADAMS 시뮬레이션 결과를 Fig. 5와 같이 비교하였다. Fig. 4는 Delta 병렬로봇의 ADAMS 모델링 결과를 나타낸다. Fig. 5에서 연결링크를 집중질량으로 가정하여 발생한 동역학식의 최대오차가 x축 및 y축 방향 모두 1Nm이하임을 확인하였다.

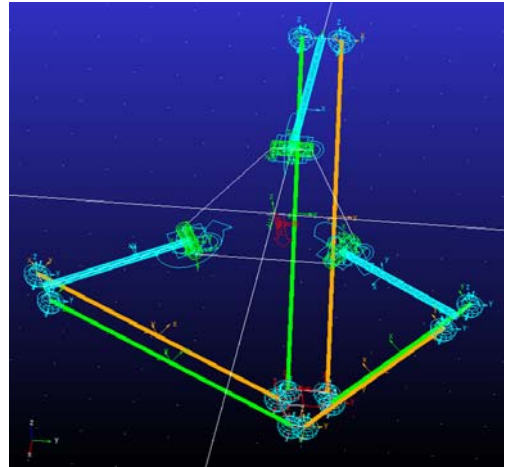


Fig. 5 ADAMS modeling and simulation

Table 1 Kinematic parameters of Delta robot prototype

Parameters	Values [mm]
Radius of the fixed base (a)	100
Radius of the moving platform (b)	22.5
Link1 length (l_1)	171
Link2 length (l_2)	396

Table 2 Mass Properties of Delta robot prototype

Parameters	Values
Link1 mass (m_1)	426g
Link2 mass (m_2)	69g
Moving platform mass (m_p)	96g
Link1 mass center (l_{1c})	61.84mm
Link1 inertia (I_1)	$39.8 \times 10^{-4} \text{kg} \cdot \text{m}^2$
Motor and gear inertia ($\gamma^2 I_a$)	$25^2 \times (0.24 + 0.03) \times 10^{-4} \text{kg} \cdot \text{m}^2$

Table 3 Specifications of the selected servo motor & gear (Mitsubishi KP-23B + ATG PGX44-H25)

	Motor output		Gear output	
	rated	max.	rated	max.
Torque[Nm]	0.64	1.9	16.0	47.5
Speed[rps]	50	100	2	4

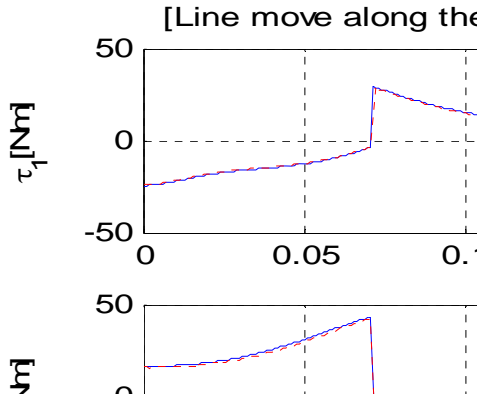


Fig. 6 Inverse dynamics simulations
(solid: dynamics equation, dotted: ADAMS)

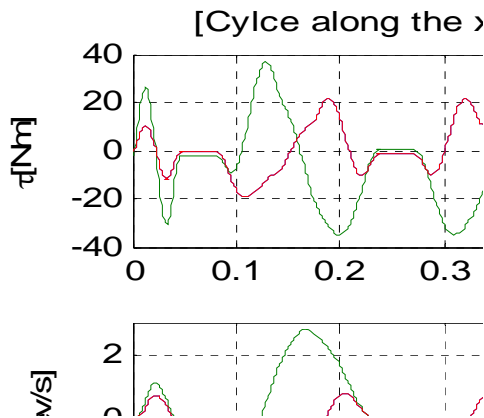


Fig. 7 Cycle time simulation results

다음으로 (25-300-25)mm cycle 궤적^[11](cycle time = 0.43sec, $v_{max} = 5m/s$, $a_{max} = 100m/s^2$)에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 6으로부터 x축 방향보다 y축 방향으로 이동시 최대토크, 최대각속도, 최대동력이 감소함을 알 수 있다. Fig. 5, 6에서 최대토크가 기어출력단의 최대토크 47.5Nm이

하이므로 병렬로봇 시작품의 가만하중은 1kg 이상임을 알 수 있다.

5. 시작품 개발 및 제어실험

Fig. 7은 Delta 병렬로봇 시작품 및 PC기반 개방형 제어기 시스템을 나타낸다. 제어기 하드웨어는 Host PC, DAQ가 장착된 실시간 Target PC 및 AC 서보 드라이브로 구성된다. Fig. 8은 MathWorks사의 Simulink와 xPC Target으로 작성된 실시간 제어프로그램을 나타낸다. PID 관절제어기의 제어루프는 0.2msec로 역기구학 및 계산토크 제어 루프는 1.0msec로 설정하였다. Fig. 9는 xPC Target 실시간 제어기의 TET (Task Execution Time)을 나타낸다. Intel CPU (2.16GHz dual core)에서 PID 제어는 약 0.03msec, 간략화된 동역학식 계산에 약 0.04msec가 소요됨을 알 수 있다.

Fig. 10(a)는 모터축에서 나타낸 부하관성의 변화를 나타낸다. Fig. 10(b)는 cycle 궤적에 대한 동역학항들의 크기를 나타낸다. 원심력 및 중력항(C, G)들보다 관성항(M)이 매우 큼을 알 수 있다. Delta 고속 병렬로봇은 부하관성 및 관성력이 크게 변화하므로 계산토크 제어를 이용하여 변화하는 관성력을 보상해줄 필요가 있음을 알 수 있다.

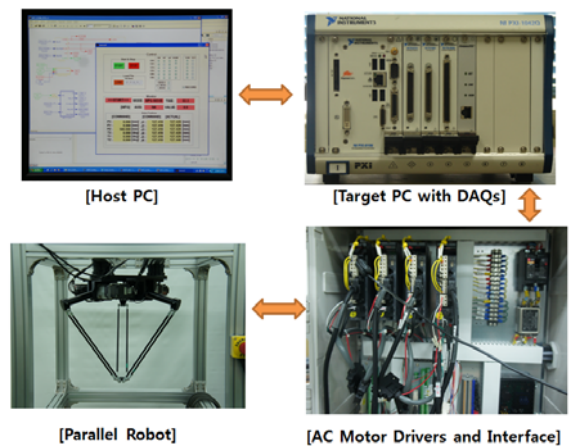


Fig. 8 Configuration of Delta robot control system

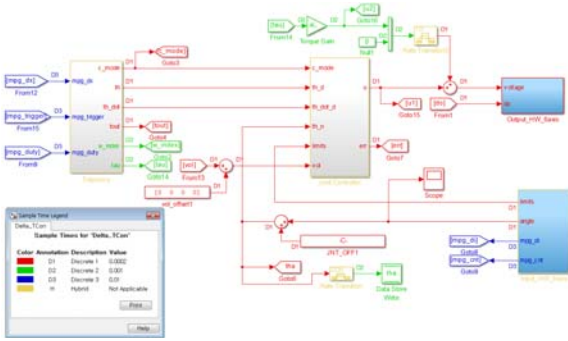


Fig. 9 Control program with Simulink and xPC Target

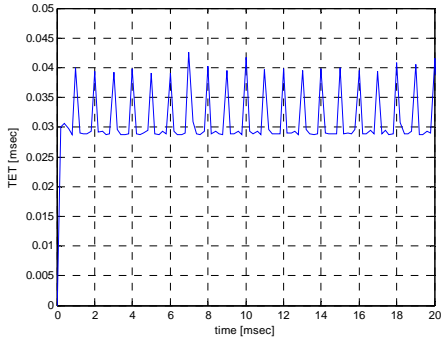


Fig. 10 TET of the real-time control program

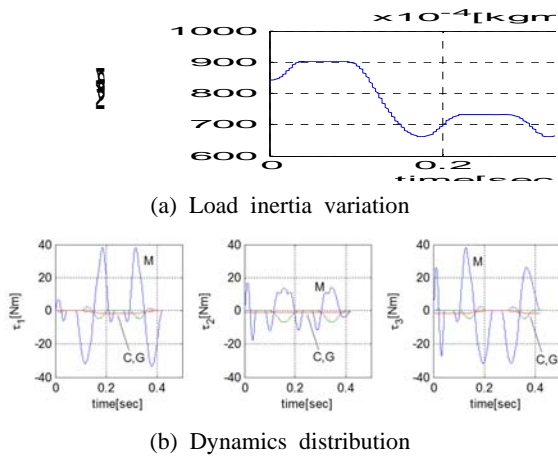


Fig. 11 Cycle trajectory along the y-axis

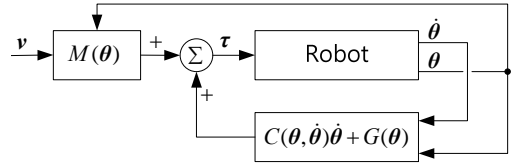


Fig. 12 Computed torque control block diagram

식 (20)은 기존 직렬형 로봇의 동역학식과 동일한 구조를 가지므로 Fig. 11과 같이 기존 제시된 계산토크 제어 방법^[10]을 사용하였다. 계산토크 제어를 위하여 구동기의 토크를 다음과 같이 계산하여 입력한다.

$$\tau = M(\theta)v + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) \quad (21)$$

여기서,

$$v = \ddot{\theta}_d + K_d \dot{e}_\theta + K_p e_\theta \quad (22)$$

여기서 $e_\theta = \theta_d - \theta$, $\dot{e}_\theta = \dot{\theta}_d - \dot{\theta}$, $\ddot{e}_\theta = \ddot{\theta}_d - \ddot{\theta}$ 로 정의하고 하첨자 d 는 목표값을 나타낸다. 식 (20)과 식 (21)을 합치면 $C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta}$ 와 $G(\theta)$ 항들은 소거되

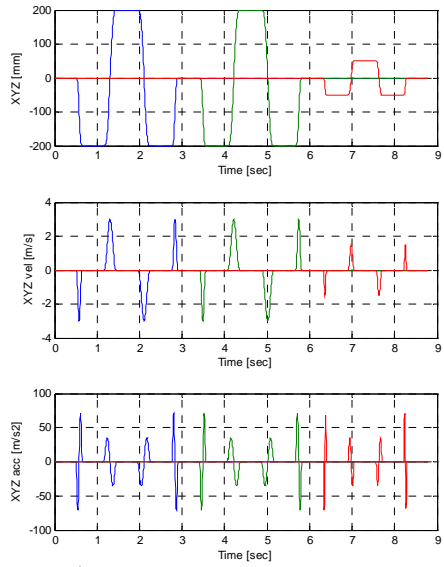


Fig. 13 Trajectory for control experiments

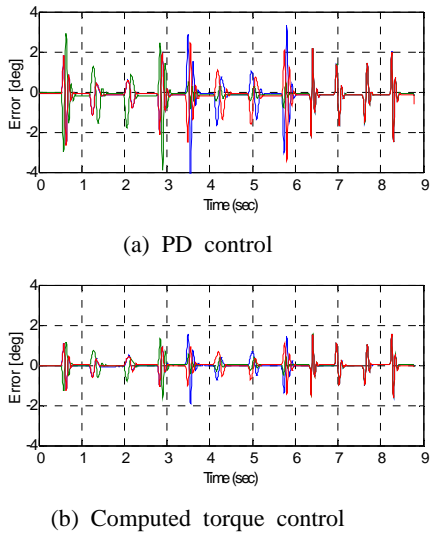


Fig. 14 Control experiment results

고 양변에 $M^{-1}(\theta)$ 를 곱하면 다음과 같은 선형 오차 동역학식이 남게 된다.

$$\ddot{e}_\theta + K_d \dot{e}_\theta + K_p e_\theta = 0 \quad (23)$$

계산토크제어 실험을 위하여 x, y, z축으로 각각 ± 200 , ± 200 , ± 50 mm 이동하는 직선궤적 ($v_{max} = 3\text{m/s}$, $a_{max} = 70\text{m/s}^2$)을 Fig. 12와 같이 작성하였다. Fig. 13(a)는 PD 제어시의 제어오차를 나타내고 Fig. 13(b)는 계산토크 제어시 제어오차를 나타낸다. 계산토크 제어시 PD 제어시 보다 제어오차 약 50% 감소되었음을 알 수 있다.

6. 결론

본 논문은 고속연산이 가능한 간략화된 동역학식을 유도하고 이를 ADAMS 시뮬레이션과 비교하여 정밀도를 검증하였다. 이 동역학식을 실시간 제어기에 구현한 계산토크제어가 PD 제어기에 비하여 오차를 50%정도 감소하였음을 확인하였다.

REFERENCES

- [1] Clavel, R., "Delta, a Fast Robot With Parallel Geometry," 18th International Symposium on Industrial Robots (ISIR), Sydney, Australia, pp. 91-100, 1988.
- [2] Pierrot, F., Nabat, V., Krut, S., and Poignet, P., "Optimal Design of a 4-DOF Parallel Manipulator: From Academia to Industry," IEEE Trans. Rob., 25(2), pp. 213-224, 2009.
- [3] Miller, K., and Clavel, R., "The Lagrange-Based Model of Delta-4 Robot Dynamics," Robotersysteme, 8(4), pp. 49-54, 1992.
- [4] Miller, K., "Experimental Verification of Modeling of Delta Robot Dynamics by Direct Application of Hamilton's Principle," Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'95), Nagoya, Japan, pp. 532-537, 1995.
- [5] Staicu, S., "Recursive Modeling in Dynamics of Delta Parallel Robot," Robotica, 27(2), pp. 199-207, 2009.
- [6] Stamper, R. E., "A Three Degree of Freedom Parallel Manipulator with Only Translational Degree Freedom," Ph. D. Thesis, University of Maryland, 1997.
- [7] Codourey, A., "Dynamic Modeling and Mass Matrix Evaluation of the Delta Parallel Robot for Axes Decoupling Control," Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'96), pp. 1211-1218, 1996.
- [8] Codourey, A., "Dynamic Modeling of Parallel Robots for Computer-Torque Control Implementation," Int. J. Robot. Res., 17(12), pp. 1325-1336, 1999.
- [9] L. W. Tsai, Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators, New York, Wiley, pp. 449-453, 1999.
- [10] Spong, M. W., Hutchinson, S., and Vidyasagar, M., Robot Modeling and Control, John Wiley & Sons, pp. 294-299, 2006.
- [11] Available at: <http://www.abb.com>