

제조 공정용 로봇 매니플레이터의 효율적 다물체 동역학 해석 모델링 기술 개발

송인호*[†] · 류한식* · 최진환**

* 평선베이(주), ** 경희대학교 기계공학과

The Efficient Dynamic Modeling of a Manipulator Robot System

In-Ho Song^{*}, Han-Sik Ryu^{*} and Jin-Hwan Choi^{**}

^{*} Solution Group, FunctionBay, Inc.,

^{**} Dept. of Mechanical Engineering, Kyung Hee Univ.,

(Received February 16, 2015 ; Revised March 31 2015 ; Accepted April 10, 2015)

Key Words: Robot Manipulator(로봇 매니플레이터), MBD(다물체 동역학), CAE(컴퓨터 응용공학), RecurDyn(다물체 동역학 해석 소프트웨어)

초록: 기존의 자동차 생산라인의 경우 샤프트를 중심으로 양측에 일렬로 배치된 로봇들이 작업을 진행하기 때문에 길고 넓은 공장 부지가 필요하다. 하지만 일렬이 아닌 이열 삼열로 로봇을 배치하여 작업을 진행할 수 있다면, 생산 공장 부지를 최대 절반이하로 줄일 수 있고, 생산 설비를 보다 적은 면적에 설치함으로 로봇 구동 에너지 또한 감소시킬 수 있다. 하지만, 이와 같이 좁은 공간에서 다양한 작업을 수행하려면 여러 작업 기구 장착이 가능한 모듈형 로봇과 원거리에서도 작업이 가능한 가늘고 긴 형태의 로봇 매니플레이터를 개발해야만 한다. 이때 로봇을 가상의 공간에서 사전에 모델링해서 가장 최적의 로봇 형태에 대한 성능 평가를 진행할 수 있다면 로봇 개발시 개발 시간의 단축과 개발 비용을 획기적으로 줄일 수 있는데 이러한 평가 작업에 CAE기법들이 활용된다. 특히 로봇의 동역학적 거동 특성을 분석하기 위해서는 다물체 동역학 기법이 활용되는데, 이때 기존 모델링 기술보다 더 효과적이고 좋은 결과를 얻을 수 있는 효율적인 로봇 동해석 모델링 기술에 대하여 연구 진행되었다.

Abstract: Recently, the robot manipulators are needed more slim size and longer reach and more accurate movement for increasing productivity. So, in this paper, the simulation modeling method and the efficient modeling method for new slim & long reach robot has been investigated for forecasting the slim robot performance before making prototype. To do this investigation, the major parts of robot driving system such as motor, belt and reducer devices and parts assembly method have been investigated mainly. And then, using this developed modeling method the new designed robot will be forecasted about the dynamic performance of new designed robot.

1. 서론

기존의 자동차 생산 라인에 자동차 샤프트를 중심으로 양 측면에 일렬로 제조 공정용 로봇 매니플레이터들이 배치되어 생산 작업을 수행하는 방식이다. 이와 같은 일렬 로봇 배치 방식의 경우, 다수의 생산용 로봇들이 횡으로 줄지어 연속적으로 배치되기 때문에 생산 공장의 길이가 필연적으로 길어질 수밖에

[†] Corresponding Author, Inho@functionbay.co.kr

없이 결국 넓은 공장부지 면적이 필요하고, 또한 넓은 공간에 생산라인을 설치하기 때문에 막대한 설비 투자비용이 발생한다. 이에 따라 최근에는 설비 투자비용 절감과 생산성 향상을 위하여 일렬 배치가 아닌 이열, 삼열로 로봇 매니플레이터를 좁은 공간에 고밀도로 배치하여 여러 대의 로봇들이 동시에 여러 작업을 진행하는 고밀도 제조 공정 개념이 새롭게 제시되고 있다. 이러한 고밀도 제조 공정 개념을 적용하면 기존 공장부지 대비 40~50% 수준으로 줄일 수 있으며 보다 짧은 시간에 동일한 작업을 수행하는 장점이 있다. 반면 좁은 공간에서 로봇들이 동시에 작업을 수행하기 때문에 근거리에서 여러 작업을 수행할 수 있는 모듈형 로봇과 원거리에서 작업을 수행할 수 있는 날씬하고 길이가 긴 슬림형 로봇등과 같이 새로운 로봇 형태의 타입들이 요구된다. 이러한 모듈형, 슬림형 로봇을 새롭게 설계하고 검증 단계에서 CAE기법을 활용하여 새로운 로봇의 설계 검증과 특히 로봇의 동적 거동 특성을 파악하기 위하여 다물체 동역학 해석 기술이 사용된다. 본 연구에서는 다물체 동역학 해석 소프트웨어인 리커다인(RecurDyn)을 활용하여 모듈형 및 슬림형 로봇의 동적 거동 특성을 파악하기 위한 로봇 시뮬레이션 모델링 기술을 연구하고 로봇 구동부의 중요 부품들에 대한 동특성 분석을 보다 효율적으로 해석할 수 있는 동해석 모델링 기술에 대하여 연구하였다.

2. 로봇 매니플레이터에 대한 효과적인 다물체 동역학 모델링 기술 개발

로봇 관절 부는 모터, 벨트, 감속기등과 같은 다수의 구동 부품들이 조립되어 구동된다. 이러한 구동부 부품 각각의 동특성들이 조합되어 최종적으로 로봇 매니플레이터 관절 전체의 동적 거동 특성으로 나타나게 된다. 따라서 정확한 로봇 관절부에 대한 동적 거동 특성을 예측하기 위해서는 각각의 구동 부품에 대한 정확하고 효과적인 동역학 해석 모델링 기술에 대한 개발이 요구되어진다. 물론, 각 구동 부품의 정밀한 동역학 모델링 기술을 개발하면 정확한 동적 특성을 해석할 수 있지만 해석 모델 구성 비용과 해석 비용이 기하급수적으로 상승한다. 따라서 본 연구에서는 최소한의 동역학 모델링 비용으로 최대한의 동적 특성 결과를 도출하기 위하여 효과적이고 단순화한 로봇 관절부 구동 부품들의 동해석 모델링 기술 개발을 목표로 연구를 진행하였다. 또한, 개발된 효과적인 모델링 기술을 새로운 타입의 모듈형 및 슬림형 로봇 동해석 모델에 적용하여 새로운 형태에 대해서 로봇 동적 거동 특성을 분석 및 성능 평가하여 새로운 타입의 로봇에 대한 개발을 진행하였다.

2.1 전기 모터 동해석 모델링 기술

로봇 매니플레이터 관절부 동력은 보통 전기모터가 이용된다. 전기모터에 대한 모델링은 수식 (1)을 기반으로 리커다인의 CoLink(제어 알고리즘 해석 툴킷^(1,2)) 모듈에서 PMDC(Permanent Magnet excited DC motor)블록 모델로 모델링되고 전기모터에 대한 구동 토크 해석이 수행된다. PMDC 모터 블록의 전압 평형에 대한 수식은 다음의 수식 (1)과 같다.

$$V_a = R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + E \quad (1)$$

전압 평형식에서 전기자 사이의 자력에 의해 발생하는 역기전력(E)은 수식 (2)와 같이 모터의 회전 속도와 전압 상수를 곱하여 계산한다. 또한, 모터 토크는 수식 (3)과 같이 전류와 전압 상수의 곱으로 계산되며 전류와 비례관계를 갖는다. 수식에 사용된 변수들에 대한 정의는 다음의 Table 1과 같다.

$$E = K_E \omega_m \quad (2)$$

$$T_e = K_T I_a + K_T I_a \quad (3)$$

Table 1 Variables of the voltage valance equation

Variables	Description
Va	Input Voltage
Ra	Armature Resistance
Ia	Armature Current
La	Armature Inductance
E	Back Electromotive
Ke	Voltage Constant
Wm	Angular Speed
Te	Electrical Torque
Kr	Torque Constant

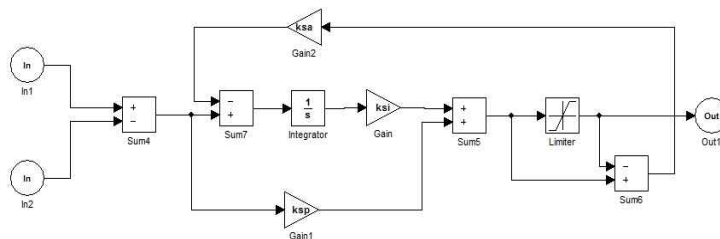


Fig. 1 Speed controller in RecurDyn/CoLink

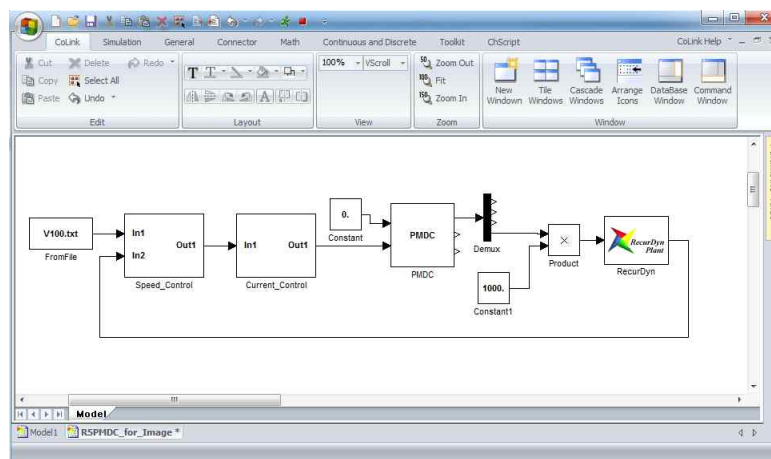


Fig. 2 Motor drive system & interfacing with MBD model in RecurDyn/CoLink

안티와인드업(Anti-windup) 제어기 기법을 적용하여 PMDC 모터 블록을 제어할 수 있는 속도와 전류 제어기를 Fig. 1과 같이 리커다인의 CoLink 모듈에서 구성하였다.

위와 같이 구성된 속도와 전류 제어기 알고리즘은 Fig. 2와 같이 리커다인의 CoLink 모듈에서 모터 블록과 연결된다. 이때, 사용자가 입력한 로봇 관절의 회전 속도 프로파일에 따라 제어된 속도와 전류가 모터 블록에 입력되고 모터 블록이 토크를 계산하여 출력하면 출력된 토크는 로봇의 동역학 해석 모델의 관절 조인트에 전달되어 로봇 관절이 구동하여 동적 거동을 해석하게 된다.

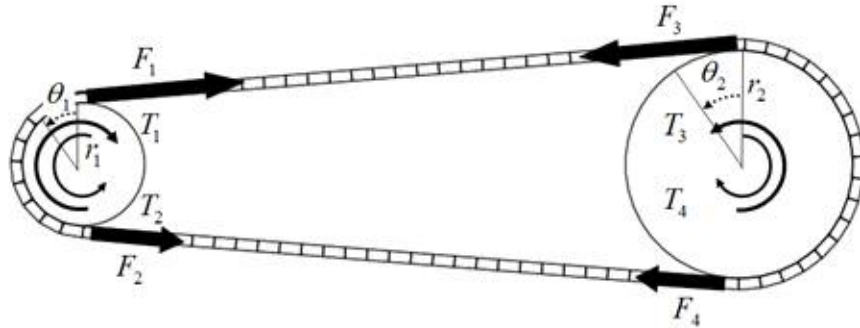


Fig. 3 Dynamic modeling of belt driving system

2.2 벨트 구동부 동해석 모델링 기술

벨트 구동부 시스템은 구동 풀리와 피동 풀리에 벨트가 감김으로써 구동풀리 회전에 벨트가 이송되고 벨트에 연결된 피동풀리가 회전력을 전달받게 되는 구조로 구성된다. 벨트 구조를 상세히 모델링 하기 위해서는 벨트와 풀리의 치형에 대한 정확한 치형 모델링과 풀리 치형과 벨트 치형 사이의 접촉 모델링을 정의하여 두 물체 사이의 접촉힘을 계산해야 한다. 하지만, 이러한 접촉 관계에 대한 상세 모델링을 적용할 경우 모델 생성 비용과 해석 소요 시간 비용이 너무 비싸지기 때문에 모델링 효율성이 굉장히 떨어진다. 이러한 고비용 접촉 모델링 방식은 빠르게 결과를 도출할 수 없고 결과 분석이 효율적이지 않기 때문에 본 연구에서는 벨트와 풀리 사이의 힘과 토크의 평형식으로 유도하여 각각의 위치에서 발생하는 힘과 토크를 직접 계산하여 각 요소에 힘을 직접적으로 부여하는 방식의 모델링 기술을 개발하였다.

벨트와 풀리 사이의 힘과 토크 평형식은 구동 풀리의 회전시 풀리의 회전각과 풀리에 감겨있는 벨트가 인장되는 길이에 따라서 벨트의 강성에 의해 힘과 토크가 발생되고 이 힘과 토크가 각각의 부품들에 적용되는 계산식으로 다음의 수식(4)~(11)으로 유도하였다. 수식에서 K 는 벨트의 강성(stiffness)계수, C 는 벨트의 감쇠(Damping)계수, θ_1 과 θ_2 는 각각 구동 풀리와 피동 풀리의 회전각이며 r_1 과 r_2 는 각각 구동 풀리와 피동 풀리의 반경을 나타낸다.

$$F_1 = K(r_1\theta_1 - r_2\theta_2 - PT/K) + C(r_1\dot{\theta}_1 - r_2\dot{\theta}_2) \tag{4}$$

$$F_2 = -K(r_1\theta_1 - r_2\theta_2 + PT/K) - C(r_1\dot{\theta}_1 - r_2\dot{\theta}_2) \tag{5}$$

$$F_3 = -K(r_1\theta_1 - r_2\theta_2 - PT/K) - C(r_1\dot{\theta}_1 - r_2\dot{\theta}_2) \tag{6}$$

$$F_4 = K(r_1\theta_1 - r_2\theta_2 + PT/K) + C(r_1\dot{\theta}_1 - r_2\dot{\theta}_2) \tag{7}$$

$$T_1 = F_1 \times r_1 \tag{8}$$

$$T_2 = F_2 \times r_1 \tag{9}$$

$$T_3 = F_3 \times r_2 \tag{10}$$

$$T_4 = F_4 \times r_2 \tag{11}$$

2.3 감속기 동해석 모델링 기술

로봇 관절부에 사용되는 감속기를 정교하게 모델링하기 위해서는 감속기 내부의 여러 기어 매커니즘에 대한 상세 모델링을 적용하여 감속기 전체를 상세 모델링해야 한다. 이 경우 여러 기어쌍 각각의 기어 치형 생성과 치형 사이의 접촉 매커니즘을 적용한 접촉 계산식을 적용해야 하기 때문에 고비용 저효율 모델링 방법이 된다. 이러한 고비용 저효율 모델링을 빠르고 효과적으로 모델링하기 위해 감속기 내부 여러 기어쌍을 대표하는 단 하나의 대표 기어로 단순화하고 Fig. 4와 같이 감속기 자체의 비선형적인 강성효과와 감쇠효과 및 감속기 백래쉬 특성 효과들을 감속기 대표 기어 모델에 부여하여 감속기 전체를 효율적으로 해석하는 모델링 기법으로 기

술을 개발하였다.

구체적인 감속기 모델링 방법은 Fig. 5와 같이 감속기 전체를 대표하는 기어쌍을 모델링하고 기어와 기어 사이를 컴플라이언스 힘 요소로 모델링하였다. 이때, 기어의 회전에 따라서 발생하는 힘에 관한 평형식에 기어의 대표 강성효과와 감쇠효과 및 백래쉬를 적용한 컴플라이언스 힘요소로 기어의 토크를 계산하고 해당 토크를 구동기어와 피동기어에 직접 부여하는 방식의 모델링 기술을 개발하였다.

2.4 로봇 관절 부품 조립 모델링

Fig. 6에서와 같이 모터, 벨트 및 감속기 부품들이 조합되어 로봇 매니플레이터의 관절부가 구성된다. 이러한 로봇 관절부 동작을 위한 모터, 벨트 및 감속기의 각 부품에 대한 모델링 방법은 앞 절에서 기술되었다. 본 연구에서 기술 개발된 각 부품에 대한 모델링 기술을 조합하여 로봇 관절부 전체에 대한 구동부 모델링을 진행하였다. 모터 모델링에서 구동 토크가 생성되고 이를 벨트부의 구동 풀리가 전달 받아서 벨트가 이송되어 피동 풀리를 회전시키게 되면 피동 풀리에 연결된 감속기 모델의 구동기어부에 토크가 전달된다. 이 토크를 전달받은 감속기는 감속기의 강성, 감쇠력과 백래쉬에 의해 최종적으로 로봇 암을 회전시키는 구동을 하게 된다.

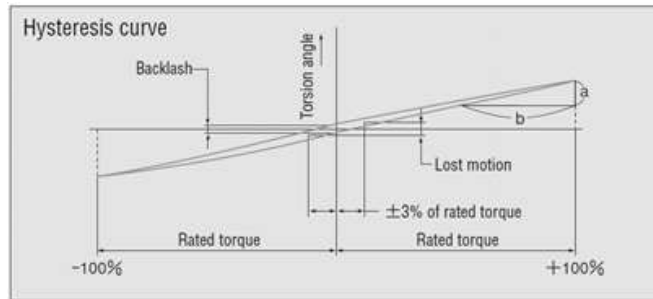


Fig. 4 Dynamic characteristic of robot reducer

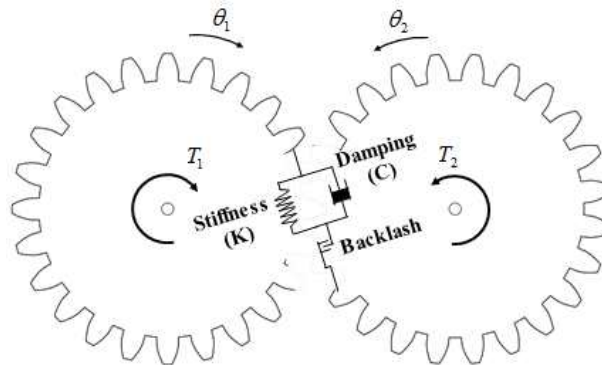


Fig. 5 Robot reducer modeling method

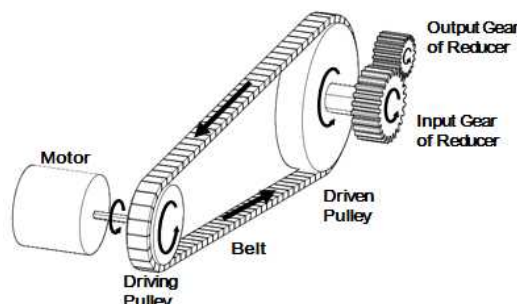


Fig. 6 Assembly modeling of robot joint

3. 순환 공식을 이용한 운동방정식

효과적인 로봇 매니퓰레이터 동해석 모델링 방법에 관하여는 앞장에서 기술하였다. 제안된 로봇 모델링 방법을 다물체 동역학의 상대좌표계로 강체 바디들의 위치와 자세를 표현하고 속도 변환법을 사용하여 로봇 모델에 대한 운동방정식을 유도하였다.

절대좌표계를 기준으로 강체 바디의 병진속도와 회전각속도는 다음과 같이 정의 된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{r}} \\ \mathbf{w} \end{bmatrix} \quad (12)$$

병진속도와 회전각속도를 바디 좌표계로 변환하면 다음과 같다.

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^T \dot{\mathbf{r}} \\ \mathbf{A}^T \mathbf{w} \end{bmatrix} \quad (13)$$

여기서, \mathbf{Y} 는 병진과 회전에 대한 속도 벡터가 되고, 순차적으로 연결된 강체 바디들을 상대좌표계로 속도 관계식을 유도하면 다음과 같다.

$$\mathbf{Y}_i = \mathbf{B}_{(i-1)i1} \mathbf{Y}_{(i-1)} + \mathbf{B}_{(i-1)i2} \dot{\mathbf{q}}_{(i-1)i} \quad (14)$$

위 식에서, $\mathbf{q}_{(i-1)i}$ 는 상대좌표의 벡터가 되고, $\mathbf{B}_{(i-1)i1}$ 과 $\mathbf{B}_{(i-1)i2}$ 는 $\mathbf{q}_{(i-1)i}$ 의 함수이다. 유사하게, 순환적 가상변위(recursive virtual displacement)의 관계도 다음과 같이 정의된다.

$$\delta \mathbf{Z}_i = \mathbf{B}_{(i-1)i1} \delta \mathbf{Z}_{(i-1)} + \mathbf{B}_{(i-1)i2} \delta \mathbf{q}_{(i-1)i} \quad (15)$$

위 식(14)과 같은 순환 공식이 각각의 모든 조인트에 적용되면 직교좌표와 상대좌표사이의 속도 관계는 다음과 같이 유도된다.

$$\mathbf{Y} = \mathbf{B} \dot{\mathbf{q}} \quad (16)$$

여기서, \mathbf{B} 는 상대 좌표를 직교 좌표로 변환하는 변환행렬(Transformation Matrix)이며, \mathbf{Y} 와 $\dot{\mathbf{q}}$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_0^T, \mathbf{Y}_1^T, \mathbf{Y}_2^T, \dots, \mathbf{Y}_n^T \end{bmatrix}_{nc \times 1}^T \quad (17)$$

$$\dot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_0^T, \dot{\mathbf{q}}_{01}^T, \dot{\mathbf{q}}_{12}^T, \dots, \dot{\mathbf{q}}_{(n-1)n}^T \end{bmatrix}_{nr \times 1}^T \quad (18)$$

여기서, nc 와 nr 은 각각 절대 좌표계와 상대 좌표계에서 정의된 일반좌표의 개수이다. $\dot{\mathbf{q}}$ 는 \mathbf{R}^{nr} 에서의 임의의 벡터이기 때문에 임의의 벡터 $\dot{\mathbf{x}} \in \mathbf{R}^{nr}$ 에 대해서도 다음과 같이 나타낸다.

$$\mathbf{X} = \mathbf{B} \dot{\mathbf{x}} \quad (19)$$

$$\mathbf{X}_i = \mathbf{B}_{(i-1)i1} \mathbf{X}_{(i-1)} + \mathbf{B}_{(i-1)i2} \mathbf{x}_{(i-1)i} \quad (20)$$

여기서, $\mathbf{X} \in \mathbf{R}^{nc}$ 는 행렬 \mathbf{B} 와 벡터 $\dot{\mathbf{x}}$ 의 곱한 결과 벡터이다. 결과적으로, $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^{nr}$ 을 $\mathbf{B}\mathbf{x} \in \mathbf{R}^{nc}$ 로의 변환은 수치적 효율을 높이기 위하여 적용된 순환적 속도 공식 식(20)에 의해 계산 된다. 반대로, \mathbf{R}^{nc} 에 속해 있는 \mathbf{G} 벡터는 \mathbf{R}^{nr} 의 새로운 벡터 $\mathbf{g} = \mathbf{B}^T \mathbf{G}$ 로 변환 될 수 있다. 이러한 변환은 직교 좌표계에서 정의된 힘들을 상대 좌표계에서의 일반화된 힘으로 계산 할 수 있게 한다. 직교 좌표계에서 계산된 힘

$\mathbf{Q} \in \mathbf{R}^{nc}$ 수행한 가상 일(Virtual Work)은 다음의 식으로 정의된다.

$$\delta \mathbf{W} = \delta \mathbf{Z}^T \mathbf{Q} \quad (21)$$

식에서, $\delta \mathbf{Z}$ 을 $\delta \mathbf{Z} = \mathbf{B} \delta \mathbf{q}$ 으로 변환하여 식(21)에 대입하여 풀어내면 다음의 식(22)으로 유도된다.

$$\delta \mathbf{W} = \delta \mathbf{q}^T \mathbf{B}^T \mathbf{Q} = \delta \mathbf{q}^T \mathbf{Q}^* \quad (22)$$

여기서, $\mathbf{Q}^* \equiv \mathbf{B}^T \mathbf{Q}$ 이다.

구속 조건이 주어진 시스템의 운동방정식은 다음의 식과 같이 정의된다.

$$\mathbf{F} = \mathbf{B}^T (\mathbf{M} \dot{\mathbf{Y}} + \Phi_Z^T \lambda - \mathbf{Q}) = \mathbf{0} \quad (23)$$

위 식에서, λ 는 \mathbf{R}^m 에서 절단된 조인트(Cut Joint)의 라그랑지 멀티플라이어 벡터(Lagrange Multiplier Vector)이며, Φ 는 \mathbf{R}^m 에서 위치 수준 구속 벡터(Position Level Constraint Vector)로 표현된다. \mathbf{M} 과 \mathbf{Q} 는 각각 직교좌표계에서 접촉력이 포함된 질량 행렬과 힘 벡터이다.

운동 방정식과 위치 수준 구속 벡터는 $\dot{\mathbf{q}}$ 을 \mathbf{v} 로 표현하여 다음과 같이 다시 표현된다.

$$\mathbf{F}(\mathbf{q}, \mathbf{v}, \dot{\mathbf{v}}, \lambda) = \mathbf{0} \quad (24)$$

$$\Phi(\mathbf{q}) = \mathbf{0} \quad (25)$$

위치 수준 구속의 연속적 미분 항들은 다음과 같이 산출되어 진다.

$$\dot{\Phi}(\mathbf{q}, \mathbf{v}) = \Phi_q \mathbf{v} - \mathbf{v} = \mathbf{0} \quad (26)$$

$$\ddot{\Phi}(\mathbf{q}, \mathbf{v}, \dot{\mathbf{v}}) = \Phi_q \dot{\mathbf{v}} - \gamma = \mathbf{0} \quad (27)$$

식(24)와 모든 구속 조건들의 수는 미지수의 수보다 적은 미분 대수 시스템(Differential Algebraic System, DAS)이다. DAS를 풀기 위해 BDF(Backward Differentiation Formula)에 대한 알고리즘은 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{H}(\mathbf{p}) = \begin{bmatrix} \mathbf{F}(\mathbf{q}, \mathbf{v}, \dot{\mathbf{v}}, \lambda) \\ \Phi(\mathbf{q}) \\ \dot{\Phi}(\mathbf{q}, \mathbf{v}) \\ \ddot{\Phi}(\mathbf{q}, \mathbf{v}, \dot{\mathbf{v}}) \\ \mathbf{U}_0^T(\mathbf{q} + \beta_0 \mathbf{v} + \beta_1) \\ \mathbf{U}_0^T(\mathbf{v} + \beta_0 \dot{\mathbf{v}} + \beta_2) \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (28)$$

여기서, $\mathbf{p} = [\mathbf{q}^T, \mathbf{v}^T, \dot{\mathbf{v}}^T, \lambda^T]^T$, β_0 , β_1 과 β_2 는 암시적 적분기(Implicit Integrator)의 계수로 결정되어지

고, \mathbf{U}_0 는 행렬 $\begin{bmatrix} \mathbf{U}_0^T \\ \Phi_q \end{bmatrix}$ 와 같은 $nr \times (nr - m)$ 크기의 행렬이 된다.

식 (28)에서는 유도된 식의 수와 미지수의 수가 같기 때문에 식 (28)은 \mathbf{p} 를 계산 할 수 있다. \mathbf{p} 의 해석 값을 얻기 위하여 Newton Raphson법이 적용되었다.

$$\mathbf{H}_p \Delta \mathbf{p} = -\mathbf{H} \quad (29)$$

$$\mathbf{p}^{i+1} = \mathbf{p}^i + \Delta \mathbf{p}, \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (30)$$

$$\mathbf{H}_p = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_q & \mathbf{F}_v & \mathbf{F}_\ddot{v} & \mathbf{F}_\lambda \\ \Phi_q & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \dot{\Phi}_q & \dot{\Phi}_v & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \ddot{\Phi}_q & \ddot{\Phi}_v & \ddot{\Phi}_\ddot{v} & \mathbf{0} \\ \mathbf{U}_0^T & \beta_0 \mathbf{U}_0^T & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{U}_0^T & \beta_0 \mathbf{U}_0^T & \mathbf{0} \end{bmatrix} = \mathbf{0} \tag{31}$$

4. 수치해석 결과

본 연구에서 제시된 각 부품 모터, 벨트 및 감속기의 모델링 기술과 부품들의 조립 모델링 기술을 통하여 Fig. 7과 같이 고밀도 공정용 제조 로봇에 적용하여 로봇의 동역학적 거동 특성에 대한 결과를 시뮬레이션 하였다.

위 로봇 동역학 모델에 관절 조인트의 회전 속도를 Fig. 8과 같이 초기 위치에서 +90도 -180도의 관절 위치로 회전 한 뒤 원위치로 복귀하는 관절 모션을 정의하여 로봇 관절부를 구동하는 시뮬레이션을 수행하였다. 또한, 동일한 로봇 관절 모션 프로파일을 실 테스트 로봇 기구에 적용하여 실측 결과도 도출하여 본 연구에서 개발된 로봇 시뮬레이션 예측 결과와 직접 비교하였다.

로봇 거동을 측정된 위치는 로봇암의 맨 끝부분에 대하여 측정 포인트를 생성하고 해석 시간에 대하여 각 방향에 대한 위치 결과를 측정하였다. 또한, 구동하는 로봇 관절에 대하여 관절부의 감속기에서 발생하는 감속기 구동 토크를 측정하여 비교하였다.

Fig. 9(a)와 (b)의 그래프는 실험과 시뮬레이션의 두 결과를 비교한 위치 데이터 그래프이다. 로봇을 구동 시킨뒤 측정 포인트에서 Y방향과 Z방향 위치 변화 결과를 한 그래프에 비교한 것으로 붉은색 그래프는 실제 로봇의 결과이며 파란색 그래프가 시뮬레이션 결과 그래프이다. 그래프에서 두 그래프의 결과가 매우 잘 일치됨을 확인할 수 있다.

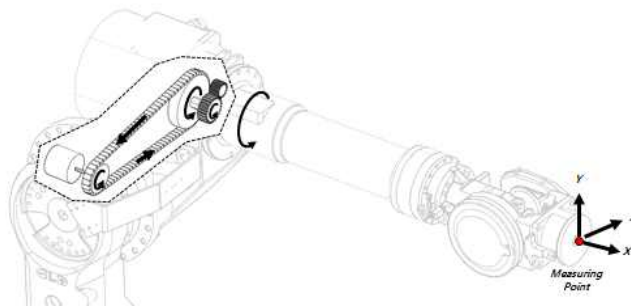


Fig. 7 Robot arm configuration

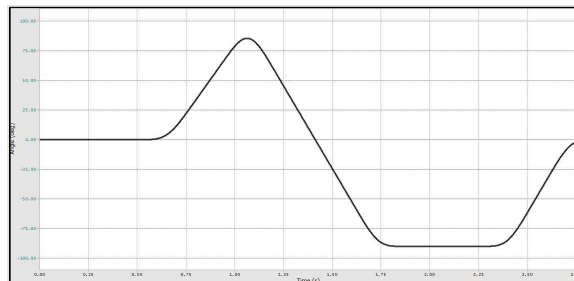


Fig. 8 Robot arm rotation motion profile

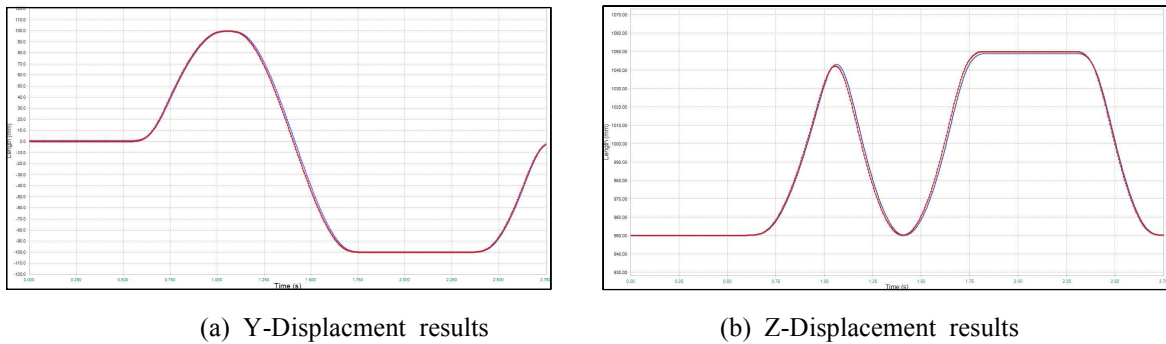


Fig. 9 The displacement results of the robot end-tip

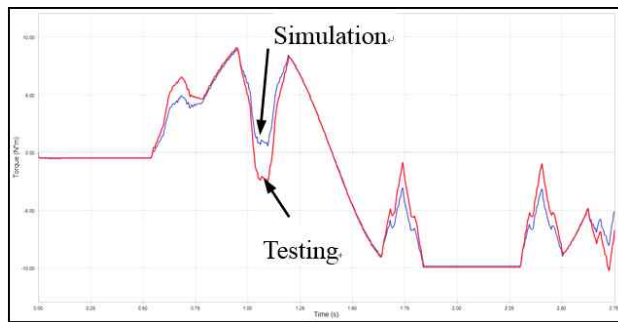


Fig. 10 Torque result of the joint of rotation arm

아래의 Fig. 10은 로봇 관절부 구동 시 감속기의 구동 토크를 도출하여 비교한 그래프이다. 실 로봇의 구동토크 그래프는 붉은색 그래프이며, 시뮬레이션에서 도출한 결과는 파란색 그래프이다. 결과 그래프의 대부분의 시간구간에서 매우 잘 일치하는 결과를 보여주고 있으나, 특정 시간 구간에서 오차율이 커지는 현상을 확인하였다. 이에 대한 분석 결과, 로봇 암의 회전 방향을 전환할 때 감속기에서 발생하는 비선형 마찰력이 실제 로봇에서 발생하고 있으나 시뮬레이션 모델에서는 조인트 비선형 마찰력 부분에 관한 모델링 기법이 적용되지 않아 오차가 발행하는 것으로 판단된다. 하지만, 로봇 관절 구동의 대부분의 시간구간에서는 매우 잘 일치하는 결과를 보여주고 있고 최대 최저 구동 토크에 대한 예측 결과는 정확하기 때문에 본 연구에서 기술 개발한 효과적 로봇 모델링 기술은 고밀도 제조 공정용 로봇을 설계시 동적 거동에 대한 동특성을 파악하기 위한 시뮬레이션 작업에 충분히 활용할 수 있는 매우 효과적인 로봇 동해석 기술이 될 수 있음을 본 연구과 실 실험을 통하여 확인하였다.

5. 결론

본 연구에서 효과적인 로봇 관절의 구동 시뮬레이션을 위한 로봇 관절부의 각 부품 모터, 벨트 및 감속기들에 대한 효과적인 동해석 모델링 기술을 개발하였다. 또한, 각 부품 모델링을 조합하는 기술을 통하여 모터에서 구동력을 생성하고 이 구동력을 벨트, 감속기 및 로봇암 순으로 순차적으로 발생된 힘을 전달할 수 있는 기술을 개발하였다. 이러한 효과적인 로봇 모델링 기법을 통하여 시뮬레이션한 결과와 실제 로봇에서 측정한 결과를 상호 비교함으로써 본 연구에서 제시된 로봇 시뮬레이션 모델링 방법의 유효성을 검증 평가 하였다. 본 연구에서 개발된 효과적 로봇 모델링 기술들을 고밀도 공정용 로봇이나 이와 유사한 로봇 시스템에 적용하면 보다 빠르고 효과적으로 로봇의 동역학적 거동 특성을 도출 할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌
(References)

- (1) Yun, D. J., A Case Study of Mechatronic System Simulation: Forklift Electric Control, 7th International Conference on Multibody System, Nonlinear Dynamics and Control, Parts A, Band C, Vol. 4, pp. 1551~1556
- (2) FunctionBay, 2012, "RecurDyn V8R1 Solver Theoretical Manual."
- (3) Angeles, J., 1997, "Fundamentals of Robotic Mechanical System," Springer.
- (4) Wittenbrug, J., 1977, "Dynamics of System of Rigid Bodies," B. G Teubner, Stuttgart .
- (5) Yen, J., Haug, E. J. and Rotra, F. A. 1990, "Numerical Method for Constrained Equations of Motion in Mechanical Systems Dynamics," Technical Report R-92, Center for Simulation and Design Optimization, Department of Mechanical Engineering and Department of Mathematics, University of Iowa, Iowa City, Iowa.