한국소음진동공학회 2013년 추계학술대회논문집, pp. 99~100

벨트 구동계를 갖는 3-Link Planar Arm의 동적 거동 해석

Analysis of Dynamic Behavior of 3-Link Planar Arm with Belt Drive System

이태엽† · 임성수*

Taeyeop Lee and Sungsoo Rhim

1. 서 론

현재 솔라셀 패널과 같이 대형, 대면적 패널 이송 시 사용되는 로봇은 동력 전달원으로 벨트를 사용한다. 하지만 작업수행 시 벨트의 탄성에 의해 관절부위에서 변형이 일어나게 되며 이는 링크의 진동으로 이어져 패널에 손상을 입힌다. 이를 해결하기 위해 대부분의 로봇은 관절부위마다 감속기나 모터를 사용하지만 이는 경제적인 측면과 로봇 전체의 하중의 증가로 비효율적이다. 본 논문에서는 벨트를 동력 전달원으로 하며 관절부위마다 풀리로만 구동되는 로봇의 수학적 모델을 제시하였으며 수치해석을 이용한 시뮬레이션 프로그램을 설계 후 로봇의 동적 거동 해석을 수행하였다.

2. 모델링 및 해석

2.1 수학적 모델

(1)기구학적 특성

본 연구에 사용될 로봇은 그림1과 같이 벨트 구동계를 포함하는 3개의 링크로 구성되며 기구학적인 특성을 그림2를 통해 기술한다. 로봇을 구동하는 모터 토크는 r번 풀리에 가해지며 0,1,3번 풀리는 각각 1,2,3번 링크에 고정되어있고 f,2번 풀리는 각각 이전 링크에 고정되어있어 각각의 링크는 서로 반대방향으로 회전한다. 또한 각각의 풀리의 기어비차에 의한 특성으로 결국 3번링크가 직선 왕복운동이 가능하도록 한다.

† 경희대학교 기계공학과
E-mail : leety1011@hotmail.com
Tel : 031-201-2498
* 경희대학교 기계공학과

(2)운동에너지

로봇의 운동방정식을 유도하기 위한 과정으로 먼저 운동에너지를 도출하기 위해 그림3과 같이 각각의 벨트 구동계로 도식화하여 운동에너지를 구한다.

$$T_{Total} = \sum_{i=1}^{n} (T_{li} + T_{mi}), \tag{1}$$

(where, $li = 1,\ 2,3,\ \ mi = r, 0, \cdots, 3$)

여기서 T_{li}, T_{mi} 는 각각 링크와 풀리의 운동에너지이다.

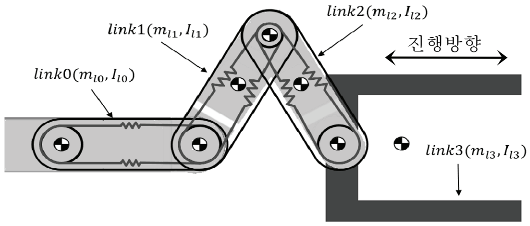

Figure 1 3-Link Planar Arm Robot

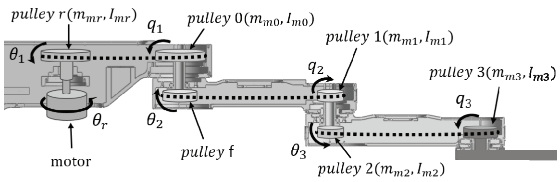

Figure 2 Cutting Plane of the Robot

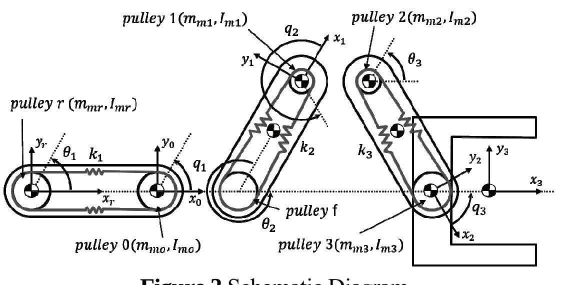

Figure 3 Schematic Diagram

(3)위치에너지 유도

그림4와 같이 벨트 구동계를 linear spring으로 모델링하고, 이를 모델에 적용하여 위치에너지를 유도한다. 이때 그림4의 별표지점에서 탄성력이 집중되며, 벨트와 풀리 상호간에 항상 이상적으로 tension이 작용한다고 가정한다.

$$U_k = \frac{1}{2}(\boldsymbol{u}_i - \boldsymbol{u}_j)^T \boldsymbol{K}_i (\boldsymbol{u}_i - \boldsymbol{u}_j) \quad (2)$$

$$(\text{where, } \boldsymbol{u}_i = [r_1\theta_1 \;\; r_1\theta_2 \;\; r_2\theta_3]^T,$$

$$\boldsymbol{u}_j = [r_1 q_1 \;\; r_2 q_2 \;\; r_1 q_3]^T,$$

$$\boldsymbol{K}_i = diag(k_1, k_2, k_3))$$

이 과정에서 벨트에 의한 탄성력과 풀리 반지름의 곱인 토크차이가 기어비를 발생하게 하는 요인이다.

(5)운동방정식 유도

운동에너지, 위치에너지를 이용하여 Constraint Lagrange equation을 통해 로봇에 대한 최종 운동 방정식을 유도한다.

$$L = T_{Total} - U_k + \boldsymbol{C}^T \boldsymbol{\lambda} \quad (3)$$

$$(\text{where, } \boldsymbol{C} = [c_1 \;\; c_2]^T,\; \boldsymbol{\lambda} = [\lambda_1 \;\; \lambda_2]^T)$$

$$L = T_{Total} - U_k + \lambda_1 c_1 + \lambda_2 c_2$$

$$\boldsymbol{G}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{X}} + \boldsymbol{C}(\boldsymbol{X}, \dot{\boldsymbol{X}})\dot{\boldsymbol{X}} + \boldsymbol{B}\dot{\boldsymbol{X}} + \boldsymbol{K}\boldsymbol{X} + \boldsymbol{C}_q{}^T \boldsymbol{\lambda} = \boldsymbol{Q}_\tau \quad (4)$$

$$\left(\text{where, } \boldsymbol{G}(\boldsymbol{q}) = \begin{pmatrix} \boldsymbol{B} & \boldsymbol{S} \\ \boldsymbol{S}^T & \boldsymbol{M}_L + \boldsymbol{M}_M + \boldsymbol{S}\boldsymbol{B}^{-1}\boldsymbol{S}^T \end{pmatrix}\right)$$

여기서 $\boldsymbol{G}(\boldsymbol{q})$ 는 complete inertia matrix이며, $\boldsymbol{C}(\boldsymbol{X}, \dot{\boldsymbol{X}})$ 는 Coriolis와 centrifugal힘을 나타내며 $\boldsymbol{C}_q{}^T$ 는 constraint Jacobian matrix를 나타낸다.

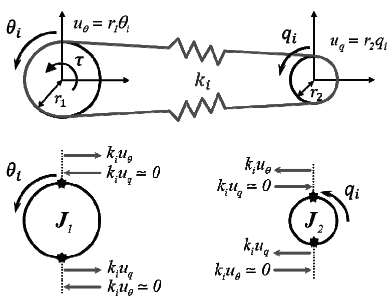

Figure 4 Single Belt Drive System

2.2 시뮬레이션

수치해석을 이용한 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 유도된 운동방정식에 8000N·mm의 Step torque를 일정하게 가한 후 강성의 변화에 따른 end-effector의 trajectory와 2번 링크에 포함되어 있는 2,3번 풀리 사이의 각 변위 차를 시뮬레이션 하였다.

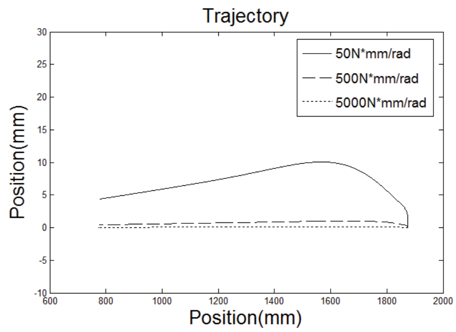

Figure 5 Trajectory of End-effector

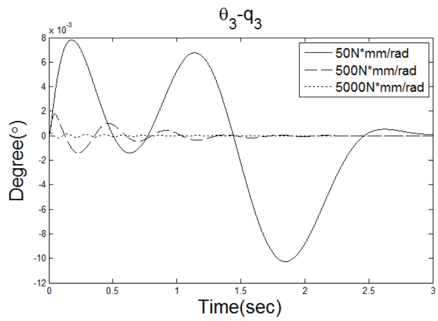

Figure 6 Angular displacement of 3th Belt Drive System

3. 결 론

본 논문에서는 벨트 구동계로만 이루어진 로봇에 대하여 수학적인 모델을 제시하였으며 수치해석적인 해를 구하여 시뮬레이션을 수행해 보았다. 그 결과 일정한 토크 입력에 대하여 벨트의 강성이 증가함에 따라 end-effector의 진동과 벨트 구동계의 각 변위 차가 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 산업원천기술개발사업의 ‘솔라셀 제조공정용 로봇시스템 개발’ 연구과제(20131041)의 재원으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] M. W. Spong, “Modeling and control of elastic joint robots,” *Trans. ASME J. Dynamics Syst. Meas. Contr.*, 109:310-319, 1987

[2] Fung, R.-F, “Dynamic analysis and system identification of an LCD glass-handling robot driven by a PMSM,” *Applied Mathematical Modelling*, 34 (5), pp. 1360-1381, 2010