

마스터-슬레이브 조작기에서 제한된 힘반영제어기 구조를 고려한 Tendon 설계

Tendon Design for Master-Slave Manipulator in Consideration of Constrained Force Reflection Control Structure

#강민식¹, *김남형²

#M.S. Kang(mskang@kyungwon.ac.kr)¹, *N. H. Kim²

¹ 경원대학교 기계자동차공학과, ² 경원대학교 기계자동차공학과

Key words : Master-Slave Manipulator, Bilateral Control, Tendon, Position Tracking, Force Reflection, Modal Analysis

1. 서론

본 연구에서는 방사능 오염물질 처리 공간인 핫셀(hotcell) 내부에서의 작업을 위해 제작 중인 6-자유도 원격 조작기를 대상으로 한다. 원격 조작기는 양방향제어(bilateral control)가 일반적으로 적용되며, 슬레이브 조작기가 마스터 조작기의 운동을 추종하고, 슬레이브 조작기에 외부 힘이 작용하는 경우 조작자가 그 힘을 느낄 수 있도록 하는데 있다.

본 연구에서는 조작기 크기 감소를 위해 모든 구동기를 조작기의 베이스에 장착하고 텐던을 통해 링크까지 동력을 전달토록 하였다. 저자들이 조사한 바 텐던을 이용한 마스터-슬레이브 조작기의 제어에 관한 연구는 보고되지 않았으며, 특히 제한된 제어기 구조를 이용한 경우는 본 연구가 처음에 해당된다.

2. 텐던구동 조작기 동적모델

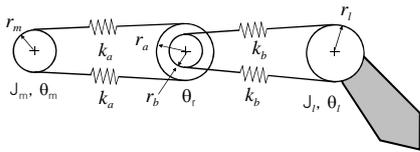


Fig.1 Schematic Model of Tendon Driven Link

텐던을 이용한 동력 전달 구조는 Fig.1과 같이 좌측의 모터폴리, 우측의 링크폴리, 중단의 감속폴리로 구성되며, 좌우 텐던은 독립적으로 연결된다. 감속기의 회전관성은 구동부와 링크의 회전관성에 비해 작아 무시할 수 있으며, 각 폴리의 반경을 같다. 마스터와 슬레이브 조작기의 각 링크들은 상호 대응되므로 동일 회전축의 운동 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$master: \begin{cases} J_m \ddot{\theta}_m + K_m \theta_m - K_m \theta_1 = \tau_{mc} \\ J_1 \ddot{\theta}_1 + K_m \theta_1 - K_m \theta_m = \tau_h \end{cases} \quad (1-1)$$

$$slave: \begin{cases} J_s \ddot{\theta}_s + K_s \theta_s - K_s \theta_2 = \tau_{sc} \\ J_2 \ddot{\theta}_2 + K_s \theta_2 - K_s \theta_s = \tau_e \end{cases} \quad (1-2)$$

3. 제어기 구조를 고려한 텐던 설계

3.1 제어기 구조

조작기는 방사능지역에서 작업을 수행하므로 슬레이브 조작기 링크에 센서 장착이 한계가 있다. 이러한 제한점을 고려하여 선정된 제어기는 다음과 같다.

$$\begin{cases} \tau_{mc} = \alpha \{ K_p (\theta_s - \theta_m) + K_d (\dot{\theta}_s - \dot{\theta}_m) \} \\ \tau_{sc} = - \{ K_p (\theta_s - \theta_m) + K_d (\dot{\theta}_s - \dot{\theta}_m) \} \end{cases} \quad (2)$$

여기서 α 는 힘반영비로 슬레이브 링크의 접촉력의 α 배 만큼 조작자가 느낄 수 있다. 식(2)의 제어기 구조상 마스터-슬레이브 링크 동력학은 제어루프 외부에 존재하므로 슬레이브 링크에 외력이 작용하는 경우 추종성능을 보장할 수 없는 한계점이 존재한다.

3.2 텐던 설계

식(1)에서 마스터와 슬레이브 조작기의 고유진동수는 $\lambda_{m1} = 0, \lambda_{m2} = K_m(1/J_m + 1/J_1), \lambda_{s1} = 0, \lambda_{s2} = K_s(1/J_s + 1/J_2)$ 이다. $\lambda_{m1} = 0$ 와 $\lambda_{s1} = 0$ 은 강체모드로 동일하게 회전하는 모드이며 λ_{m2} 와 λ_{s2} 는 모터와 링크가 반대방향으로 진동하는 모드이다. 식(1)과 (2)에서 폐회로 운동방정식은 다음과 같다.

$$M\ddot{x} + Kx = bc(K_p x + K_d \dot{x}) + \tau_d \quad (3)$$

$$M = \begin{bmatrix} J_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_2 \end{bmatrix} \quad x = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_m \\ \theta_s \\ \theta_2 \end{bmatrix} \quad \tau_d = \begin{bmatrix} \tau_h \\ 0 \\ 0 \\ \tau_e \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} K_m & -K_m & 0 & 0 \\ -K_m & K_m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_s & -K_s \\ 0 & 0 & -K_s & K_s \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} 0 \\ \alpha \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad c = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}^T$$

식(3)에서 벡터 c 에 직교하는 특이벡터를 갖는 모드는 제어가 불가능하다. 이 모드를 구하면 특이치와 특이벡터는 다음 두 모드가 존재한다.

$$(i) \lambda_1 = 0, u_1 = [1 \ 1 \ 1 \ 1]^T$$

$$(ii) \lambda_2 = K_m(1/J_m + 1/J_1) = K_s(1/J_s + 1/J_2)$$

$$u_2 = [-J_m/J_1 \ 1 \ 1 \ -J_s/J_2]^T$$

첫 번째는 강체모드이고 두 번째는 반대로 진동하는 모드로 두 조작기의 고유진동수가 같을 때 발생한다. 강체모드는 상관없으나 두 번째 모드는 상대적 진동으로 추종성능을 만족하지 못한다. 일반적으로 슬레이브 조작기는 부하에 의한 처짐이 발생하므로 슬레이브의 강성을 더 크게 설계하는 것이 좋다.

4. 제어기의 설계

여기서는 앞에서 논의한 바에 따라 텐던의 강성을 가능한 높여 λ_{m2} 와 λ_{s2} 를 크게 설계하고 응답에 지배적인 영향을 미치는 두 번째 모드해석 방법을 이용한다.

식(3)의 좌변에서 모드해석을 통해 모달행렬 U 를 구하고, 좌표변환, $x = Uq$,을 한 뒤 모달행렬의 특성에 따라 식(3)은 다음 식으로 모드를 분해하여 나타낼 수 있다.

$$\ddot{q} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{m2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_{s2} \end{bmatrix} q = U^T \tau_c + U^T \tau_d \quad (4)$$

앞의서 논의에서와같이 두 번째 모드만을 취하면

$$\ddot{q}_2 + g \{ K_p q_2 + K_d \dot{q}_2 \} = \{ u_2 \}^T \tau_d \quad (5)$$

식(5)에서 두 번째 모드의 원하는 폐회로 특성이 감쇠비 ζ_d 와 고유진동수 ω_d 로 정할 경우 제어기 이득은 다음과 같다.

$$K_d = 2\zeta_d \omega_d / g, \quad K_p = \omega_d^2 / g \quad (6)$$

5. 시뮬레이션 및 논의

5.1 시뮬레이션 1

앞에 제안된 제어기 설계의 타당성 검증을 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 실험대상의 파라미터는 Table.1과 같다.

Table1 Model Parameters for Simulation 1

Variable	Symbol	Value
Moment of inertia of master driver	J_m	$1152 \times 10^{-6} [Kgm^2]$
Moment of inertia of master link	J_1	$318.5 \times 10^{-6} [Kgm^2]$
Moment of inertia of slave driver	J_s	$1152 \times 10^{-6} [Kgm^2]$
Moment of inertia of slave link	J_2	$318.5 \times 10^{-6} [Kgm^2]$
Force reflection ratio	α	0.1

3장의 해석을 검증하기 위해 마스터-슬레이브 텐던을 70.6[N/rad]으로 선정하였다. 이 경우 두 조작기의 고유진동수는 84.7[Hz]로 서로 일치해 제어 불가능한 모드가 존재한다. 결정된 이득은 $K_d=0.168$, $K_p=1.32$ 이다.

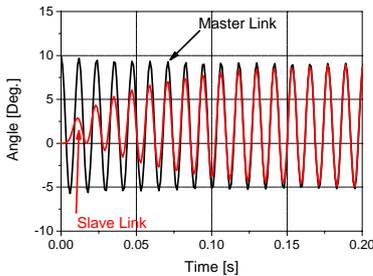


Fig. 2 Response to an initial condition (link responses)

Fig. 2는 초기조건에 따른 마스터와 슬레이브 링크의 응답으로, 초기조건은 마스터의 링크가 10°이며, 나머지 모두 0이다. 해석과 같이 84.7[Hz]의 비감쇠 진동모드가 존재함을 확인 할 수 있다.

5.2 시뮬레이션 2

추종성능과 힘반영 성능 확인 위해 시뮬레이션 하였다. 이 때 $J_2 = 0.113 [Kgm]$, $K_m = 40.2 [N/rad]$, $K_s = 296 [N/rad]$ 으로 가정하였다. 응답은 Fig. 3와 같이 초기 진동 후 오차가 영인 정상상태에 도달되었다.

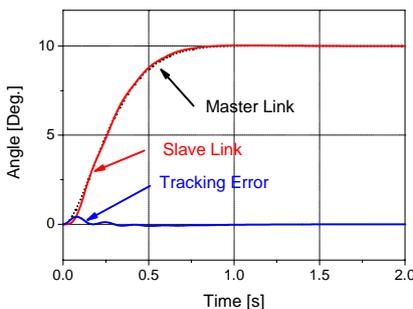


Fig. 3 Tracking response

Fig. 4는 힘반영 성능 시뮬레이션 결과로 마스터에 0.1[Nm]를 가하고 슬레이브 링크가 회전중 $\theta_2=10^\circ$ 위치에서 벽과 부딪히는 경우를 시뮬레이션 하였다.

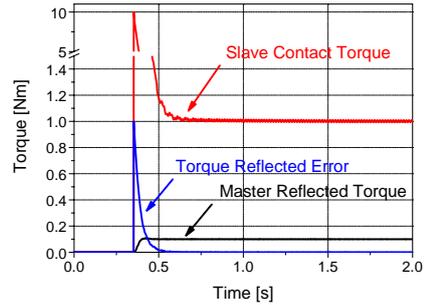


Fig. 4 Contact and reflected torques after contact

부하 변화시 힘반향을 시뮬레이션 한 결과 부하가 작을수록 접촉 직전 속도가 크므로 접촉충격은 커지지만, 정적 상태에 도달된 후 힘반영은 보장됨을 확인하였다.

6. 결론

본 연구는 텐던에 의해 구동되는 마스터-슬레이브 원격 조작기에서 제한된 구조를 갖는 양방향 제어기를 적용할 경우 슬레이브 링크의 마스터 링크 위치 추종성능과 힘반영을 목적으로 텐던의 설계 조건을 분석하였으며, 주어진 마스터 링크의 운동 조건과 사용되는 제어기 구조에 적합한 텐던의 선정방법과 제어기 설계 방법을 제시하였다.

마스터와 슬레이브 구동기의 회전각과 회전속도차이만을 이용한 비례-미분 제어기 구조에서 마스터와 슬레이브의 진동모드 주파수가 동일할 경우 제어 불가능한 모드가 발생하므로 두 고유진동수가 서로 다르도록 텐던을 설계하여야 한다. 또한 제어에 의해 폐회로의 첫 번째 고유진동수를 제외한 나머지 고유진동수는 비례이득의 증가에 따라 증가하며, 따라서 폐회로 응답에 지배적 영향을 미치는 두 번째 모드를 기준으로 용이하게 제어기를 설계할 수 있다. 제어이득 설계는 설계 감쇠비의 변화에 따른 전체 계의 폐회로 주파수 응답특성을 기준으로 각 모드가 적절한 감쇠를 갖도록 제어이득을 선정할 수 있다.

후기

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국 학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2009-0070686)이며, 2009년도 경원대학교 지원에 의한 결과임.

참고문헌

1. Vertut, J. and Coiffet. P., 1985, Teleoperation and Robotics-Evolution and Development. Vol.3A, KoganPage.
2. Lewis,F.L.,Abdallah,C.T. and Dawson,D.M.,1993,Control of Robotic Manipulators,MacMillan.
3. Chopra, N., Spong, M., Ortega, R. and Barabanov, N.E.,2004, "On Position Tracking in Bilateral Teleoperation", Proc.of the 2004 American Control Conference, Boston,pp.5244~5249.
4. Salcudean,D.E.,Zhu,M., Zhu, W.H. and K.,2000,"Transparent Bilateral Teleoperation under Position and Rate Control,"Int.J.RobotRes., Vol.19. No.12,pp.1185~1202.
5. S.Colombi,S.,"Multivariable Design of Bilateral Master-Slave Force Reflecting Servomechanisms", 18th Symposium on Fusion Technology, Swiss Federal Institute of Technology, Switzerland.
6. Londi, F., Pennestri,E., Valentini, PP, and Vita,L., 2004, "Control and Virtual Reality Simulation of Tendon Driven Mechanism", Multibody System Dynamics, Vol.12,pp.133-145.