'89 韓國自動制御學術會議論文集 1989. 10. 27~28

유연성을 갖는 로보트 매니퓰레이터의 PI End-point 제어

정 구진*, 배 준경, 김 승록, 박 종국
경희 대학교 전자공학과 자동제어 연구실

PI End-point Control of the Compliant robot manlpulator

Gu-jin Chung*, Jun-kyung Bae, Seng-lock Kim, Chong kuk Park
Automatic Control Lab.,Dept of Electronic Eng.,Kyung Hee Univ.

Abstract

The performance of conventional robot arms is inhibited by trade-off between speed and accuracy. Because these systems measure only joint angles,in spite of slow speed,they must rely on a stiff structure in order to attain positioning accuracy. Lightweight links would allow faster motion,but their flexibility would also produce positioning errors. This research is involved with the development and evaluation of an End-point Control System whose major goal is to compensate for link deflections and thus mitigate the speed versus accuracy conflict in conventional manlpulator.

1. 서 론

지난 10 여년 동한 컴퓨터 기술의 발달은 제이 시스템의 이론과 실제에 있어서 많은 발전을 가져왔으며, 특히 로보트 분야는 눈부신 발전을 하였다. 실질적으로 로보트가 여러 산업에 응용됨에 따라 중요시 고려되는 것은 빠른속도와 높은 정확도를 유지하는 것이다. 그러나 기존의 로보트 제이에서는 단단한 ·링크에 가정한 조인트 각만을 측정함으로써 속도와 정확도사이의 불협적인 관계를 발생시켰다.

본 논문에서는 이러한 관계를 개선하고 좋은 효과를 얻기 위하여 직각 좌표계에서 직 궤환시키는 End-point 제어방식을 선택하였고 선형 제어이론을 적용한 PI 제이기를 설계하였다.[4] 그리고 두개의 유연한 링크를 갖는 유연성 구조(Compliant structure)의 로보트 매니퓰레이터에 적용하여 단단한 링크를 갖는 강성 구조 (Stiff structure) 의 로보트 매니퓰레이터와 비교하여 모의실험을 하였다.

2. 역학 모델링

두개의 유연한 링크를 갖는 로보트 매니퓰레이터 모델은 평면운동의 제약을 갖는 두개의 링크로 구성되는 Physical 모델과 Physical 메카니즘의 원리에 의하여 개발된 Analytic 모델로 분류하여 해석할 수 있다.

2.1 Physical 모델

Physical 모델은 두개의 링크와 평면의 메카니즘으로 되이있고 각 링크는 유연성을 갖는다 또한 End-effetor 가 물체를 잡을때의 기하학은 그 질량과 재질의 영향을 받으므로 현실적이고 충분한 유연성을 갖는 변수로 선택해야한다.

2.2 Analytic 모델

Physical 모델을 분석하여 컴퓨터 모의실험에 적당하도록 모델변수를 결정하고 강성 구조의 모델에 휨작용항을 첨가함으로써 역학 방정식을 구성한다

2.2.1 강체 동역학 모델

대체로 로보트 팔의 동작은 링크의 휨작용을 무시하는 역학모델에 의하여 결정되고 로보트 동작의 메카니즘에 뉴우톤- 오일러 방정식을 적용하여 Brady 의 벡터 접근방법으로 힘과 모멘트를 구한다.[3]

강체 역학 방정식은 다음과 같다.

$$\Sigma f_i = m_i \ddot{r}_i \qquad (1)$$

$$\Sigma n_i = I_i \ddot{\phi}_i + \dot{\phi}_i \times I_i \dot{\phi}_i \qquad (2)$$

여기서 I_i는 관성행렬이다.

그리므로 뉴우톤- 오일러 방정식을 구하면 다음과 같다

$$m_1 \ddot{r}_1 = f_{01} - f_{12} + m_1 g \quad (3)$$

$$m_2 \ddot{r}_2 = f_{12} - f_{23} + m_2 g \quad (4)$$

$$m_3 \ddot{r}_3 = f_{23} + m_3 g \quad (5)$$

$$I_1 \ddot{\phi}_1 = n_{01} - n_{12} - (p_1^* + r_1^*) \times f_{01} + r_1^* \times f_{12} \quad (6)$$

$$I_2 \ddot{\phi}_2 = n_{12} - n_{23} - (p_2^* + r_2^*) \times f_{12} + r_2^* \times f_{23} \quad (7)$$

$$I_3 \ddot{\phi}_3 = n_{23} \quad (8)$$

결과적으로 결합된 미분 방정식은 다음과 같이 구할 수 있다. [2]

$$\begin{aligned} n_{01} = {} & \ddot{\theta}_1[I_1+I_2+I_3+m_2 l_1 l_2 \cos(\theta_2)+(m_1 l_1^2+m_2 l_2^2)/4+m_2 l_1^2+2m_3 l_1 \\ & l_2 \cos(\theta_2)+m_3 l_1^2+m_3 l_2^2] + \ddot{\theta}_2 [I_2+I_3+m_2 l_2^2/4+m_2 l_1 l_2/2\cos \\ & (\theta_2)+ m_3 l_1 l_2 \cos(\theta_2) + m_3 l_2^2]+ \dot{\theta}_2^2 [-m_2 l_1 l_2/2\sin(\theta_2) \\ & -m_3 l_1 l_2 \sin(\theta_2)]+\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2[-m_2 l_1 l_2 \sin(\theta_2)-2m_3 l_1 l_2 \sin(\theta_2)]+ \\ & g[m_2 l_2/2\cos(\theta_1+\theta_2)+l_1(m_1/2+m_2)\cos(\theta_1)+m_3 l_1 \cos(\theta_1) \\ & +m_3 l_2 \cos(\theta_1+\theta_2)] \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} n_{12} = {} & \ddot{\theta}_1[I_2+I_3+m_2 l_1 l_2/2\cos(\theta_2)+m_2 l_2^2/4+m_3 l_1 l_2 \cos(\theta_2)+m_3 l_2^2]+ \\ & \ddot{\theta}_2 [I_2+I_3+m_2 l_2^2/4+m_3 l_2^2]+\dot{\theta}_1^2[m_2 l_1 l_2/2\sin(\theta_2)+m_3 l_1 l_2 \sin(\theta_2)] \\ & +g[m_3 l_2 \cos(\theta_1+\theta_2)] \end{aligned} \quad (10)$$

2.2.2 유체 동역학 모델

대개 로보트 팔의 동작은 강체 동역학 모델에 의하여 형성된다. 매니퓰레이터의 링크는 가속도로 부터 생기는 힘과 모멘트, 중력 그리고 관성력에 따르고 이러한 힘과 모멘트는 링크의 휨작용을 결정한다. 본 연구에서 선택된 유연성 구조의 모델은 준 정지상태 시각(Quasi-static-vision) 에서 논의된다. 이러한 준 정지상태의 모델은 강체 시스템의 대역폭 보다 넓은 대역폭을 가진 시스템으로써의 링크를 나타낸다.

따라서 로보트 매니퓰레이터의 각 링크는 다음과 같은 힘과 모멘트의 영향으로 유연성을 갖는다. [1],[8]

$$nri = n_{i+1,i} - Icdi\, \ddot{\phi}i \quad (11)$$

$$nli = Ic_{1}i\ddot{\phi}i - n_{i,i-1} \quad (12)$$

$$wgi = -mc_{2}ig/li \cos(\phi i) \quad (13)$$

$$wti = -mc_{2}i/li\, \ddot{p}_{transi} \quad (14)$$

$$wri = -mc_{2}i\, \ddot{\phi}i \quad (15)$$

nri,fri: 링크의 시작점에 적용된 구동기의 토오크와 힘

nli,fli: 링크의 끝점에 적용된 구동기의 토오크와 힘

wgi : 링크의 질량에 의하여 생기는 중력부하

wti : 관성부하

wri : 선형적으로 증가된 관성부하

$\ddot{p}_{trans}$: transverse 가속도

$\ddot{p}_{trans_0} = 0$

$\ddot{p}_{trans_1} = l_1(\dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_1) + \ddot{\theta}_1 \cos(\theta_1))$

fri 는 링크의 유연성에 영향을 주지않는다.

$$fli = -1/li(nri+nli+wgili^2/2+wtili^2/2+wrili^2/3) \quad (16)$$

각 부하에 의하여 발생하는 휨작용 항을 구하면 다음과같다.

$$Ymaxfli = fli\, li^3/3EIi \quad (17)$$

$$Ymaxnli = nli\, li^2/2EIi \quad (18)$$

$$Ymaxwti = wti\, li^4/8EIi \quad (19)$$

$$Ymaxwgi = wgi\, li^4/8EIi \quad (20)$$

$$Ymaxwri = 11wri\, li^4/210EIi \quad (21)$$

따라서 전체 휨작용 항을 식22와 같이 구할 수 있고 이러한 휨작용을 조인트 섭동각으로 변환시키면 식23과 같다

$$Ymaxi = Ymaxfli + Ymaxnli + ymaxwti + Ymaxwgi + Ymaxwri \quad (22)$$

$$\Delta\theta i = actan(Ymaxi/li) \quad (23)$$

그러므로 조인트 섭동각으로의 변환은 강체 동력학 모델에 쉽게 첨가할 수 있다.

$$\theta eff = \theta i + \Delta\theta i \quad (24)$$

따라서 유연성을 갖는 로보트 팔의End-effector의 위치를 결정하기 위하여 정역학관계를 이용하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$X = f(\theta eff) \quad (25)$$

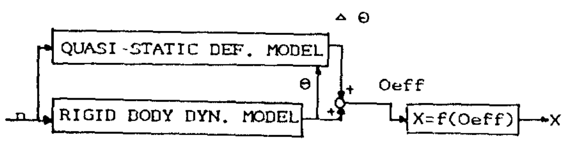


그림 2.1 모델 블럭 선도

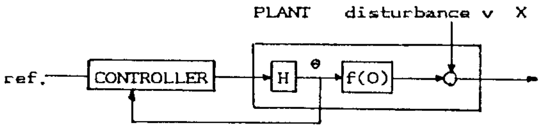
3. End-point 제어와 제어기 설계

3.1 End-Point 제어

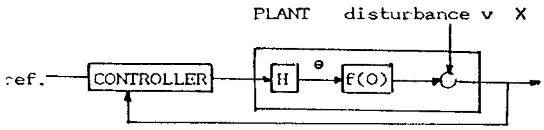
대부분의 로보트 연구에서 조인트 각을 측정함으로써 발생하는 불협적인 관계를 감소시키는 제어개념이 End-Point 제어이다.

기존의 로보트 팔의 설계는 매니퓰레이터가 강체라고 가정할때 속도와 정확도 사이의 불협적인 관계를 유발한다. 그러한 로보트 시스템은 조인트 각을 측정한후 End-effector의 정확한 직각 좌표계의 위치를 결정하기 위하여 강성 구조(stiff structure) 를 이룬다. 이것은 링크의 질량이 커짐으로써 로보트의 동작속도가 느려지고 또한 속도를 최대로 높인다고 가정할때 그 링크의 설계는 강도에 의하여 이러한 제약을 받게 될것이다. 그러나 유연한 구조(compliant-structure) 를 이루는 로보트 시스템은 가벼운 링크로 구성되어 빠른동작은 취할 수 있으나 유연성을 갖음으로써 조인트 각만으로는 End-effector의 정확한 위치를 지시할 수 없다. 이러한 결점을 보완하고 End-effector 전체적인 직각 좌표계 위치를 직 궤환시키는 제어가 End-Point 제어이다. [4],[7]

End-Point 제어와 기존의 조인트 각 궤환제어와의 차이점은 다음의 블럭선도와 같다.



CONVENTIONAL CONTROL : JOINT ANGLE FEEDBACK



END-POINT CONTROL : GLOBAL FEEDBACK

3.2 PI 제어기 설계

기존의 로보트 매니퓰레이터에 사용하고 있는 제어기는 일반적으로 강체 운동만을 제어하기 위하여 설계 되어있다. 위의 강체 역학 방정식에서는 비선형 항을 무시하지만 매니퓰레이터가 고속으로 움직일때 유연성을 갖는 로보트 시스템에서는 무시된 비선형 항은 매우 중요하다.

본 절에서는 End-point 궤환 제어방식을 선택하므로써 전향 역학관계에 의하여 조인트 벡터 o 를 End-effector 의 위치벡터 x 로 변환시킨 직각 좌표계 공간에서 역학 방정식을 제어하는 선형 제어 시스템을 설계한다. [5]

일반적인 강체의 결합된 비선형 미분 방정식은 다음과 같다.

$$M(\theta)\ddot{\theta}+N(\theta,\dot{\theta})+G(\theta)=\tau \qquad (26)$$

여기서 $M(\theta)$ 는 관성행렬

$N(\theta,\dot{\theta})$ 는 corioly & centrifugal 토오크

$G(\theta)$ 는 중력 토오크

이러한 역학 방정식에 유연성을 갖는 로보트 시스템의 휨작용항을 첨가한 토오크 벡터를 구하는 방정식은 식27과 같다.

$$M(\theta+\Delta\theta)\,(\ddot{\theta}+\Delta\ddot{\theta})+N(\theta+\Delta\theta,\dot{\theta}+\Delta\dot{\theta})+G(\theta+\Delta\theta)=T \qquad (27)$$

여기서 $\Delta\theta$ 는 조인트의 휨 작용각이고 $\theta+\Delta\theta$를 θeff로 놓으면 식27은 식28과 같이 된다.

$$M(\theta eff)(\theta eff)+N(\theta eff,\theta eff)+g(\theta eff)=T \qquad (28)$$

그리고 위의 식28을 Jarcobian 행렬을 이용하여 직각 좌표계로 변환시키면 다음과 같다.

$$Mx\ddot{X}+Nx\dot{X}+GxX=F \qquad (29)$$

그러므로 로보트 시스템 상태 방정식은 식30과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix}\dot{X}\\ \ddot{X}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & I\\ -Mx^{-1}Gx & -Mx^{-1}Nx\end{bmatrix}\begin{bmatrix}X\\ \dot{X}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0\\ Mx^{-1}\end{bmatrix}F \qquad (30)$$

그리고 기준입력 위치와 속도, 가속도를 선택한 PI 제어기를 구성하는 제어 법칙을 구하면 다음과 같다.

$$F=Kpe+Ki\int edt+Mx\ddot{X}ref+Nx\dot{X}ref+GxXref \qquad (31)$$

$$Mx\ddot{e}+Nx\dot{e}+(Gx+Kp)e+Ki\int edt=0 \qquad (32)$$

여기서 $\ddot{e}=\ddot{X}-\ddot{X}ref$, $\dot{e}=\dot{X}-\dot{X}ref$, $e=X-Xref$ 이다.

또한 궤환 제어기를 결정하기 위하여 3차 미분 방정식으로 분리시키는 오차 미분방정식을 식33과 같이 놓는다. [6]

$$\dddot{e}+D1\ddot{e}+D2\dot{e}+D3e=0 \qquad (33)$$

그러므로 제어기 이득행렬은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Kp = MxD2-Gx \qquad (34)$$

$$Ki = MxD3 \qquad (35)$$

여기서 D1,D2,D3 는 궤환 이득행렬을 결정하기위한 추적 오차이다.

4. 모의실험 및 고찰

모의실험의 목적은 강성구조를 갖는 매니퓰레이터와 비교하여 유연한 구조를 갖는 매니퓰레이터의 속도와 정확도의 관계를 나타내는데 있다.

모의실험에 사용한 상수 값은 다음과 같다

중력 G=9.8

첫번째 링크의 기준 위치각 $\theta ref(1)$ = 90

두번째 링크의 기준 위치각 $\theta ref(2)$ = 45

첫번째 링크의 기준 위치 Xref(1) = -0.42426

두번째 링크의 기준 위치 Xref(2) = 1.074264

첫번째 링크의 초기 위치각 $\theta ref(1)$ = 88

두번째 링크의 초기 위치각 $\theta ref(2)$ = 43

2.절의 모델의 경우를 보면 제어기로 부터 얻은 방정식과 함께 수학적 표현이 매우 복잡하고 상호 결합된 비선형 방정식으로 주어진다는 것을 알 수 있다. 그리고 빠른 속도를 갖는 가벼운 로보트 팔은 링크의 변형을 발생시키므로 그러한 로보트 시스템은 휨작용을 보상하는 제어기와 가벼운 링크로 인하여 그림에서와 같이 정확도가 높고 그 속도가 빠르다는 것을 볼 수 있다. 즉 그림1-3 를 보면 휨작용이 거의 일어나지않는 조인트1 에서 강체링크의 위치오차는 유연한 링크의 위치오차와 같아지고 휨작용이 일어나는 조인트2 에서는 강체링크와 유연한 링크의 오차폭이 커지면서 점차 감소하며 수렴하는 것을 볼 수 있다. 또한 그림4-5 에서 조인트1 과 조인트2 의 위치오차를 비교해 보면 조인트2 에서의 위치오차가 조인트1 에서 보다 작게 나타나므로 좋은 정확도를 보여주었고 속도오차의 경우, 그림6-9 에서 볼 수 있듯이 토오크를 고려할때 유연한 링크의 속도가 단단한 링크보다 빠르다는 것을 알 수 있다.

결과적으로 End-point 제어방식을 선택한 모의 실험을 통하여 유연성 구조의 로보트 매니퓰레이터와 강성구조 매니퓰레이터의 정확도와 속도 사이의 불협적인 관계가 개선되었음을 보여주었다.

5. 결 론

본 논문에서는 End-point 제어방식을 선택하므로써 강성구조(stiff structure) 만큼 정확도를 높혀주어 기존의 속도와 정확도 사이의 불협적인 관계를 줄여주는데 그 목적이 있다.

선형 제어이론을 적용한 PI 제어기를 설계하여 모의실험을 함으로써 유연한 구조(compliant structure)를 갖는 매니퓰레이터를 강성구조를 갖는 매니퓰레이터와 비교하였다. 그 결과 빠른 속도를 유지하는 유연성을 갖는 로보트 매니퓰레이터도 강성구조를 갖는 로보트 매니퓰레이터의 정확도와 기의 같음을 모의실험을 통하여 알 수 있었다. 즉 유연한 구조를 갖는 로보트 매니퓰레이터는 빠른 속도와 높은 정확도를 갖게되므로 기존의 로보트 시스템에서 발생하는 불협적인 관계를 줄이게 되었다.

앞으로의 과제는 유연한 구조의 로보트 매니퓰레이터를 더욱 효과적으로 제어할 수 있는 정밀한 제어기를 설계하므로써 위치에 대한 정확도를 한층 높이는데 있다.

참 고 문 헌

[1] Wayne J.Book,"Control of Flexible Robot Arms IEEE Videoconferences: Robot Dynamics and C-ontrol

[2] Wayne J.Book,"Recursive Lagrangian Dynamics of Flexible manipulator" The international jounal of robotics research

[3] Michle Bra : Robot Motion - Planing and motion

[4] Robert H.Cannon,Jr.,Eric Schmitz,"Initial E-xperiments on the End-point Control of a Fl-exible One-Link Robot," The International J-ounal of Robotics Research,3,No.3(Fall 1984) pp.62-75

[5] Timothy L.Jhonson,"Feedback Control" robot motion-planing and control

[6] Huibert Kwakerneak : Linear Optimal Control System

[7] Wayn J. Book,O.Maizza Neto,and D.E.Whitney, "Feedback Control of Two Beam,Two Joint Systems with Distributed Flexibility,"Transactions of ASME Jounal of Dynamic Systems,Measureement,and control,pp.424-435

[8] Steven Dubowsky,"The Dynamics and Control of Robot manipulators and Devices,"IEEE Videoconferences : Robot Dynamics and Control

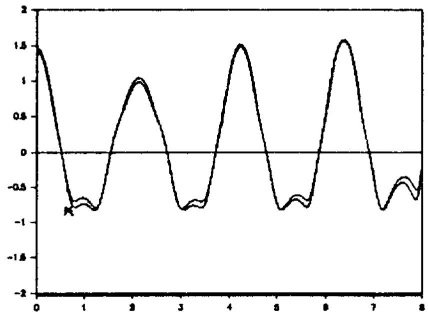


그림 1. 조인트 1. 에대한 위치오차

Exrgd : 강성 구조의 위치오차

Ex*: 유연성 구조의 위치오차

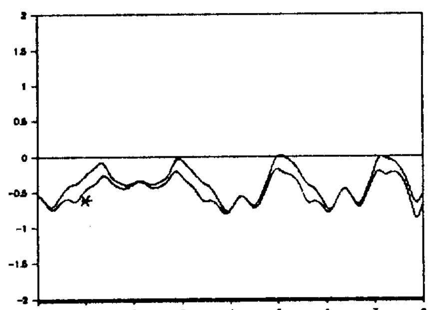


그림 2. 조인트 2. 에대한 위치오차

Exrgd : 강성 구조의 위치오차

Ex*: 유연성 구조의 위치오차

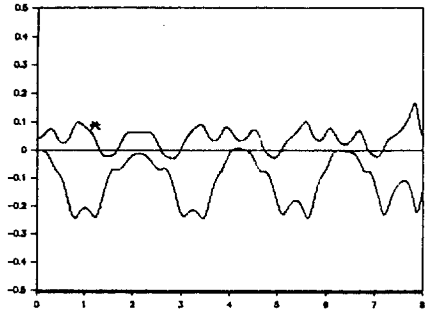


그림 3. Delta1 과 Delta2 의 비교

Delta 1*: 조인트 1. 에대한 강성구조의 위치오차 와 유연성 구조의 위치오차와의 차

Delta 2 : 조인트 2. 에대한 강성구조의 위치오차 와 유연성 구조의 위치오차와의 차

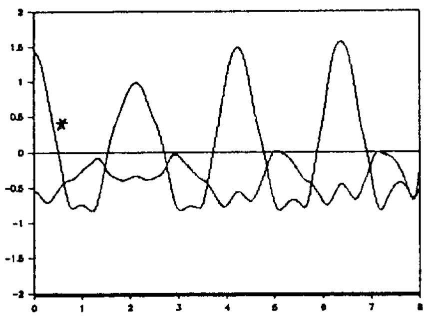


그림 4. 강성 구조의 위치오차

Exrgd 1*: 조인트1.에대한 강성 구조의 위치오차

Exrgd 2 : 조인트2.에대한 강성 구조의 위치오차

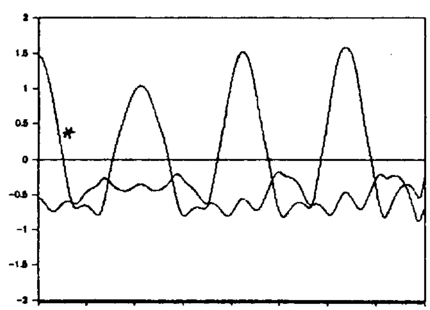


그림 5. 유연성 구조의 위치오차

Ex 1*: 조인트1.에대한 유연성 구조의 위치오차

Ex 2 : 조인트2.에대한 유연성 구조의 위치오차

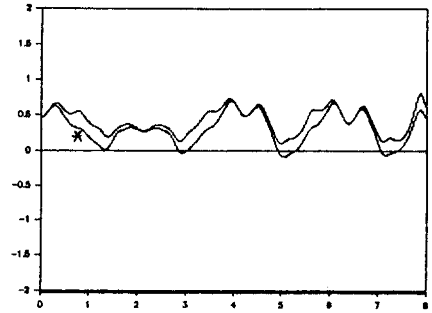


그림 6. 조인트 1. 에대한 속도오차

ExrgdD : 강성 구조의 속도오차

ExD*: 유연성 구조의 속도오차

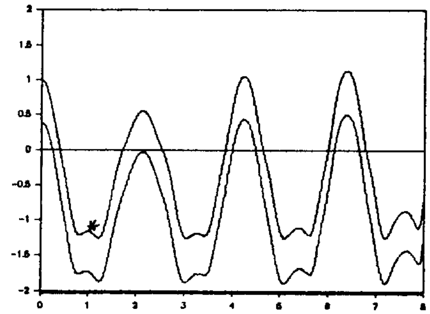


그림 7. 조인트 2. 에대한 속도오차

ExrgdD : 강성 구조의 속도오차

ExD*: 유연성 구조의 속도오차

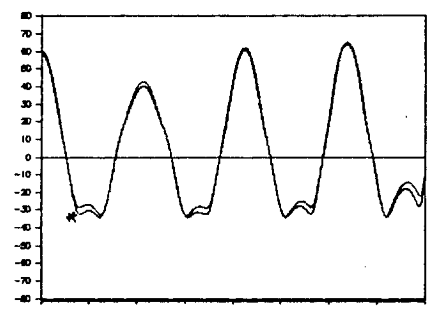


그림 8. 조인트 1. 에대한 입력 토오크

Tor*: 유연성 구조의 입력 토오크

Torrgd : 강성 구조의 입력 토오크

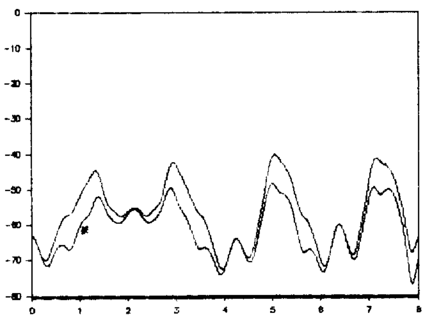


그림 9. 조인트 2. 에대한 입력 토오크

Tor*: 유연성 구조의 입력 토오크

Torrgd : 강성 구조의 입력 토오크