

2자유도 로봇의 관절외란해석과 응용

Joint disturbance torque analysis for 2 DOF robots and its application

최 명 환*
Choi, Myoung Hwan

Abstract

In a independent joint servo control of robots, the performance of the control is influenced greatly by the joint interaction torques including Coriolis and centrifugal forces. These act as disturbance torques to the control system. As the speed of the robot increases, the effect of this disturbance torque increases, and makes the high speed - high precision control more difficult to achieve. In this paper, a solution to the optimal path placement problem is presented that minimizes the joint disturbance torque during a straight line motion. The proposed method is illustrated using computer simulation. The proposed solution method can be applied to the class of robots that are controlled by independent joint servo control, which includes the vast majority of industrial robots.

키워드 : 관절서보제어, 관절외란토크, 독립관절제어, 최적경로지정

Keywords : *Joint servo control, Joint disturbance torque, Optimal path placement*

1. 서 론

로봇 팔의 운동제어는 오랫동안 많은 연구의 대상이 되어왔다. 로봇제어에 대한 많은 연구들은 편의상 다변수제어방식과 독립관절제어방식으로 분류해 볼 수 있다. 다변수 제어방식은 로봇의 동역학 운동식을 기반으로 출발하여 제어법칙을 적용하는 방법[1]으로서 다변수제어방식에 대한 대표적인 연구로는 모델에 기초한 계산토크법(Model based computed torque method)[3,4,5], 적응제어기법[6,7]등 다수가 있다. 이 방식을 실제로 적용하는 데의 어려움은 동역학 파라미터를 정확히 측정 또는 추정하기가 어렵고, 캘리브레이션 방식은 많은 계산량을 필요로 하며, 또한 이러한 제어기법들이 동역학 파라미터의 오차에 민감하다는 점이다.

독립관절제어방식은 로봇의 각 관절을 서로 독립

적인 선형시스템으로 가정하며, 타 관절의 운동으로 발생하는 관성의 변화와 코리올리스, 원심력, 중력의 영향들은 관절제어시스템에 포함되는 관절외란으로 간주한다. 이러한 제어방식의 성능은 관절제어기의 외란제거능력에 직접적인 영향을 받는다. 이 방식은 실제로 구현하기가 쉽고 경제적이며, 상업용 로봇 제어기에 널리 사용되고 있다. 이러한 제어기법은 로봇 관절의 속도가 낮고, 관절 사이의 동역학 간섭이 작은 경우 좋은 성능을 낼 수 있다. 그러나 관절의 속도가 빨라지고 관절사이의 동역학 간섭이 증가할 수록 관절외란의 영향이 증가하여 제어성능은 저하 된다.

독립관절 제어되는 로봇의 최적경로위치(optimal path placement)문제는 주어진 로봇의 작업영역 내에서의 로봇경로의 위치결정과 관련된 문제이다. 로봇의 작업, 예를 들면 조립작업이 필요할 때, 로봇 작업공간내의 작업물의 위치는 많은 경우에 작업설계자의 직감에 의해서 결정되며 작업물의 위치에 따라 로봇의 경로가 결정된다. 작업물의 위치를 변경하면 로봇의 운동경로도 따라서 변화하며, 이에 따라서 효율적인 운동이 발생 할 수 있다. 작업물의 위치

* 강원대학교 제어계측공학과 부교수

이 연구는 1997년도 강원대학교 기성회연구비에 의하여 연구되었음

결정을 작업설계자의 직감에 의존할 경우, 작업물의 위치에 따라 로봇운동의 성능이 변화 할 수 있다는 사실은 무시된다. 최적경로위치문제를 다룬 연구로는 조립작업의 위치에 대한 조작성능지수 (Manipulability)를 성능지수로 이용하여 최적의 조립물 위치를 결정하는 방법[8] 과 로봇관절운동을 최소화하며 관절위치가 관절위치영역의 중앙에 가깝도록 조립물의 위치를 결정하는 방법[9] 등이 있다.

본 논문에서는 2 자유도 로봇 팔에 대해서 관절외란의 식을 유도한 후 로봇의 최적경로위치문제의 해법으로 관절외란을 최소화하는 해를 구한다. 이 방법은 로봇의 직교좌표상의 고정도 운동을 위해서 경로 계획단계에서 관절외란이 최소화되도록 경로의 위치를 결정하는 경로계획방법이다. 제안된 최적경로위치문제의 해법을 중력장에서 동작하는 2관절 로봇의 경우에 대하여 시뮬레이션을 이용하여 실행하였다. 대상경로가 직선이고, 직선상의 운동이 주어진 경우에 로봇의 작업공간 내에서 관절외란을 최소로 하는 최적의 경로위치를 구하였다. 대상경로의 위치변화에 대한 관절외란의 변화를 조사하였으며, 최적경로위치문제의 중요성을 보였다.

2. 2 - 자유도 로봇 팔의 관절 외란식

일반적인 n 자유도 로봇 팔의 동역학 운동식은 다음의 Lagrange-Euler 운동식으로 표현될 수 있다.

$$D(q) \ddot{q} + H(\dot{q}, q) + C(q) = \tau \quad (1)$$

이때, q 는 $n \times 1$ 관절위치벡터, $D(q) = (D_{ij})$ 는 $n \times n$ 관성행렬, $H(\dot{q}, q) = (h_i)$ 는 $n \times 1$ 코리올리스 및 원심력 토크 벡터, $C(q) = (c_i)$ 는 $n \times 1$ 중력영향벡터이다. 독립관절제어방식은 로봇의 각 관절을 독립된 선형시스템으로 가정하는 방법이다. 각 관절은 모터와 이에 부착된 고정된 부하로 모델링 되어지며, 이러한 고정된 모델과 식(1)의 실제 로봇동역학 모델과의 차이, 즉, 관절의 운동으로 발생하는 관성의 변화와 코리올리스, 원심력, 중력의 영향들은 관절제어시스템에 포함되는 관절외란으로 간주한다. 이상과 같이 로봇을 n 개의 독립적인 관절제어시스템으로 본다면, 로봇 동역학식 (1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\hat{D}_{ii} \ddot{q}_i + \tau_{di} = \tau_i \quad (2)$$

여기서,

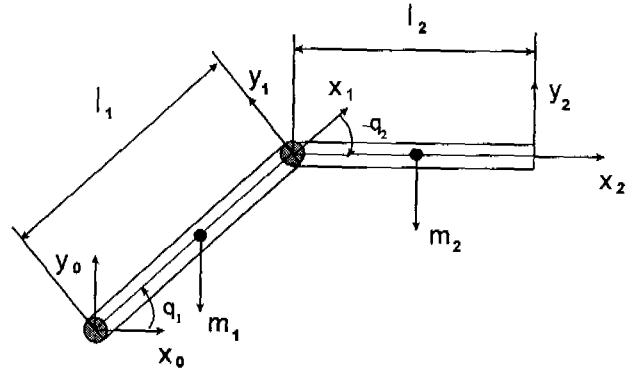


그림 1. 2자유도 로봇팔의 단순화된 모델

$$\hat{D}_{ii} = D_{ii} \text{의 항 중에서 } q \text{ 에 독립적인 항의 합.} \quad (3)$$

$$\tau_{di} = \sum_{j=1, j \neq i}^n D_{ij}(q) \ddot{q}_j + (D_{ii} - \hat{D}_{ii}) \ddot{q}_i + h_i(\dot{q}, q) + c_i(q) \quad (4)$$

정의에 의해서 \hat{D}_{ii} 는 관절위치, 속도, 가속도에 영향을 받지 않는다. 이 값을 관절 i 의 대표관성부하 (nominal inertial load)로 정의하자. 위의 식(4)에서 τ_{di} 는 i 번째 관절에 작용하는 관절외란으로서, 타 관절의 가속, 관성변화와 코리올리스, 원심력, 중력의 영향에 의한 토크 성분을 포함한다. 각 관절의 제어기는 각 관절이 독립적으로 운동한다고 간주하며, 관절의 부하가 고정된 값, 즉, 대표관성부하 \hat{D}_{ii} 이라는 가정 하에 제어시스템의 gain 값들이 설정된다. 고정된 관절부하 모델과 실제의 로봇 동역학 식과의 차이는 관절외란 τ_{di} 으로 제어시스템에 포함된다.

2개의 회전관절을 갖는 2자유도 로봇 팔의 단순화된 모델이 그림 1. 에 있다. 문제를 단순화하고 관절사이의 간섭을 명확히 하기 위해서 로봇 팔은 수직면에서 운동한다고 가정하며, 따라서 로봇 링크는 중력의 영향을 받는다. 또한 링크는 균일한 질량분포를 갖는다고 가정한다. 그림에서 m_i, l_i, q_i 는 각각 i 번째 링크의 질량, 길이, 관절위치이다. 이 로봇 팔의 Lagrange-Euler 운동식을 쓰면 다음과 같다 [2].

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

이때,

$$\begin{aligned} D_{11} &= (1/3)m_1 l_1^2 + (1/3)m_2 l_2^2 + m_2 l_1^2 + m_2 l_1 l_2 C \\ D_{12} &= (1/3)m_2 l_2^2 + (1/2)m_2 l_1 l_2 C_2 \\ D_{21} &= D_{12} \\ D_{22} &= (1/3)m_2 l_2^2 \end{aligned}$$

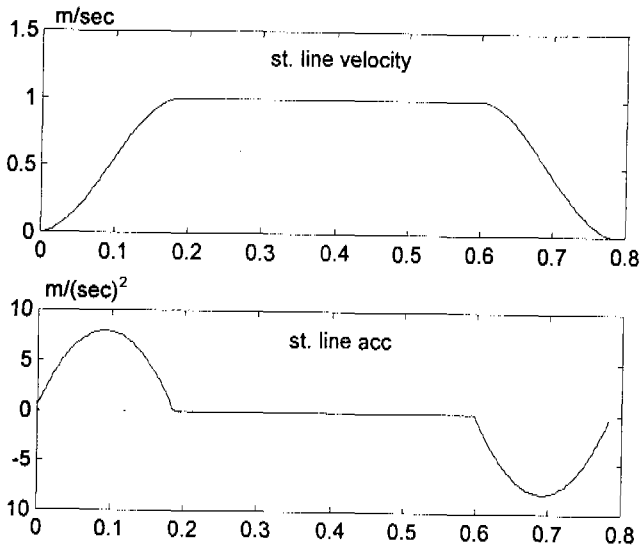


그림 2. 직선운동 속도 및 가속도 형태. 이동거리 0.6 meter, 최대속도 1 (m/sec)

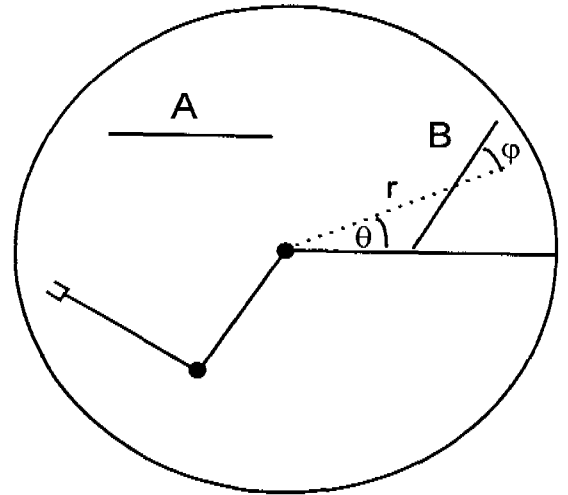


그림 3. 경로위치결정문제의 예시. A와 B는 같은 길이의 직선 경로이며, 작업공간 내의 위치만 다르다.

$$\begin{aligned}
 h_1 &= -(1/2)m_2 l_1 l_2 S_2 (2 \dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dot{q}_2^2) \\
 h_2 &= (1/2)m_2 l_1 l_2 S_2 \dot{q}_1^2 \\
 c_1 &= (1/2)m_1 g l_1 C_1 + m_2 g l_1 C_1 + (1/2)m_2 g l_2 C_{12} \\
 c_2 &= (1/2)m_2 g l_2 C_{12}
 \end{aligned}$$

이때 $C_i = \cos(q_i)$, $C_{ij} = \cos(q_i + q_j)$ 이다. 앞서 (3),(4)식의 정의에 의해서 대표관성부하(nominal inertia) \hat{D}_{11} , \hat{D}_{22} 와 관절외란 토크 τ_{d1} , τ_{d2} 는 다음과 같이 정리된다.

$$\hat{D}_{11} = (1/3)m_1 l_1^2 + (1/3)m_2 l_2^2 + m_2 l_1^2 \quad (6)$$

$$\hat{D}_{22} = (1/3)m_2 l_2^2 \quad (7)$$

$$\begin{aligned}
 \tau_{d1} &= m_2 l_1 l_2 \ddot{q}_1 C_2 \\
 &+ \ddot{q}_2 [(1/3)m_2 l_2^2 + (1/2)m_2 l_1 l_2 C_2] \\
 &- (1/2)m_2 l_1 l_2 S_2 (2 \dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dot{q}_2^2) \\
 &+ (1/2)m_1 g l_1 C_1 + m_2 g l_1 C_1 + (1/2)m_2 g l_2 C_{12}
 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned}
 \tau_{d2} &= (1/2)m_2 l_1 l_2 \ddot{q}_1 C_2 \\
 &+ (1/2)m_2 l_1 l_2 S_2 \dot{q}_1^2 + (1/2)m_2 g l_2 C_{12}
 \end{aligned} \quad (9)$$

3. 최소관절외란을 위한 최적경로위치 문제

로봇을 독립관절 제어방식으로 제어할 때, 관절외란은 각 관절의 궤적추적오차를 유발한다. 이 오차는 관절 제어기의 외란제거능력에 의해 결정된다. 예를 들면, 적분제어기를 사용하면, 고정외란(constant disturbance)에 대한 정상상태 오차(즉, $t \rightarrow \infty$ 인 경우)는 제로로 만들 수 있다. 그러나 고속 로봇운동의 경우, 관절외란은 짧은 시간 동안에 변화하기 때

문에 효과적으로 제거하기 곤란하며 추적오차가 발생한다. 로봇의 PTP 운동에서는 목표점에서의 정확한 정지위치가 관심의 대상인 반면, 직교좌표공간(Cartesian space)의 운동, 예를 들면, 직선운동의 경우는 궤적전체에서의 정확한 위치명령 추적이 관심의 대상이다. 직선운동 시에 발생하는 관절외란은 직선경로상의 추적오차(tracking error)로 나타난다. 따라서 직교좌표공간에서 고속 고정도 운동을 위해서는 경로 계획단계에서 운동 중에 발생하는 관절외란이 최소가 되도록 고려하여야 한다.

직교좌표공간에서 로봇이 직선운동을 해야하는 경우를 생각해 보자. 그림1에 2 관절 로봇의 예가 나타나 있다. 수행할 작업에 필요한 직선경로가 정해지고, 직선 상에서의 공구의 궤적도 수행할 작업의 성격에 따라 그림2 와 같이 정해졌다고 가정하자. 그림3은 로봇의 작업공간을 보여준다. 로봇의 작업공간 내에서 같은 길이의 경로 A 와 경로 B 중 어느 것이 고속 고정도 운동에 더 적합한가? 이러한 직선을 로봇의 작업영역내의 어떤 곳에 위치시키는 것이 최적인가? 이 문제를 최적경로위치 (Optimal path placement) 문제라고 한다[8, 9].

본 연구에서는 로봇의 직교좌표공간상의 고정도 운동을 위해서 직선운동계획 시에 직선운동 중의 관절외란을 최소화하는 최적경로위치문제의 해를 구한다. 직선 상에서 $t=0$ 일 때 로봇이 시작점에 있고, $t=t_f$ 일 때 종착점에 있다고 하자. 관절외란벡터를 $\tau_d = [\tau_{d1}, \tau_{d2}]^T$ 라고 하자. 이때 τ_{d1} , τ_{d2} 는 식(8), (9)에서 주어진다. 경로성능지수 Φ 를 직선경로상의 운

동시에 발생하는 최대 $\|\tau_d\|$ 값으로 정하면, 아래와 같이 표현된다.

$$\Phi = \max_{0 \leq t \leq t_f} \|\tau_d\| \quad (10)$$

최적의 경로를 찾는 방법으로는 직선의 위치를 결정하는데 필요한 변수들의 공간인 3차원 공간을 격자로 나누어 찾는 방법을 사용한다. 직선의 형태를 표현하기 위해서 polar 좌표계를 사용하면(그림3), (r, θ, ϕ) 가 직선의 형태를 결정하는 변수가 되며, 이때 (r, θ) 는 직선 중앙의 위치 (x_c, y_c) 를 표현하며, ϕ 는 r 방향과 직선의 사이각을 나타낸다. 로봇의 작업공간을 S 라고 하고, 직선의 길이를 d 라고 하자. $\theta = 0$ 으로 놓고, $\Delta r > 0$, $\Delta \theta > 0$ 와 $\Delta \phi > 0$ 를 선정한다음, 직선의 중앙점 (x_c, y_c) 를 로봇의 베이스에서부터 Δr 간격으로 이동시키며, 직선의 방향은 $\Delta \phi$ 과 $\Delta \theta$ 간격으로 회전시키며 경로성능지수 Φ 를 구하여, 최소값 Φ 에 해당하는 경로를 찾는다. 이 경우, 해의 정확도는 $\Delta r, \Delta \phi, \Delta \theta$ 크기에 의존하며, 이들의 값이 작을 때 계산부하가 증가하지만, 이 문제는 Off-line 계산으로 해결 할 수 있으므로 계산시간은 크게 문제되지 않는다. ϕ 의 범위는 $0 \leq \phi \leq 2\pi$ 범위를 조사한다. 이를 알고리즘으로 표현하면 아래와 같이 정리 할 수 있다. $Rot(z, \phi)$ 는 z축을 중심으로 한 ϕ 각 회전 변환행렬이며 l_i 는 i 번째 링크의 길이이다.

최적경로위치 알고리즘

1. Set $\Delta r > 0$, $\Delta \phi > 0$, $\Delta \theta > 0$, $\Phi_{min} = \infty$, $r_{min} = 0$, $\phi_{min} = 0$, $d = \text{path distance}$, $r_{max} = l_1 + l_2$
2. Set $r = 0$, $\phi = 0$, $\theta = 0$
3. Find initial and final position of the path

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} = Rot(z, \theta) \left\{ \begin{bmatrix} r \\ 0 \end{bmatrix} - Rot(z, \phi) \begin{bmatrix} d/2 \\ 0 \end{bmatrix} \right\}$$

$$\begin{bmatrix} x_f \\ y_f \end{bmatrix} = Rot(z, \theta) \left\{ \begin{bmatrix} r \\ 0 \end{bmatrix} + Rot(z, \phi) \begin{bmatrix} d/2 \\ 0 \end{bmatrix} \right\}$$
4. If $(x_i, y_i) \notin S$ or $(x_f, y_f) \notin S$ then goto 7
5. Compute Φ for the motion from (x_i, y_i) to (x_f, y_f) specified in Fig.2 using (8),(9),(10).
6. If $\Phi < \Phi_{min}$

$$r_{min} = r, \phi_{min} = \phi, \theta_{min} = \theta, \Phi_{min} = \Phi$$
 endif
7. Set $\phi = \phi + \Delta \phi$
 If $\phi \leq \pi$

Goto 3

endif

8. Set $r = r + \Delta r$. If $r \leq r_{max}$ Goto 3.
9. Set $\theta = \theta + \Delta \theta$. If $\theta \leq \theta_{max}$ Goto 3.
10. The optimal solution is given by the path from $(x_{i, min}, y_{i, min})$ to $(x_{f, min}, y_{f, min})$

$$\begin{bmatrix} x_{i, min} \\ y_{i, min} \end{bmatrix} = Rot(z, \theta) \left\{ \begin{bmatrix} r_{min} \\ 0 \end{bmatrix} - Rot(z, \phi_{min}) \begin{bmatrix} d/2 \\ 0 \end{bmatrix} \right\}$$

$$\begin{bmatrix} x_{f, min} \\ y_{f, min} \end{bmatrix} = Rot(z, \theta) \left\{ \begin{bmatrix} r_{min} \\ 0 \end{bmatrix} + Rot(z, \phi_{min}) \begin{bmatrix} d/2 \\ 0 \end{bmatrix} \right\}$$

4. 시뮬레이션 결과

위의 3절에서 설명한 최소관절외란을 위한 최적경로 위치 알고리즘을 그림1의 2관절 로봇의 경우에 적용한 결과를 다음에 제시한다. 식(10)의 $\|\tau_d\|$ 로는 2-norm, 즉 $\|\tau_d\|_2 = [\tau_{d1}^2 + \tau_{d2}^2]^{1/2}$ 를 사용하였고, 직선경로상의 속도 및 가속도는 그림2와 같이 사용하였으며, 시뮬레이션에서 사용한 파라미터는 아래와 같다.

$$m_1 = 10.0 \text{ Kg}, \quad l_1 = 0.4 \text{ m}$$

$$m_2 = 8.0 \text{ Kg}, \quad l_2 = 0.4 \text{ m}$$

$$\Delta r = 0.01 \text{ m}, \quad \Delta \phi = 5^\circ$$

$$d = 0.6 \text{ m}$$

이상의 방법으로 구한 최적경로에 해당하는 파라미터는 $r^* = 0.45$, $\theta^* = 130^\circ$, $\phi^* = 130^\circ$ 이며, 최소 경로성능지수 Φ_{min} 는 24.0 Nm 값을 갖는다. 구해진 최적의 경로가 그림4에 나타나 있다. 이 경로는 로봇작업영역 내의 직선경로 중에서 그림2에서 지정된 직선경로상의 운동을 수행하면서 관절외란의 최대값이 가장 작은 경로를 보여준다.

다음은 경로위치의 변화에 대한 관절외란의 변화를 조사하기 위해 위의 최적경로위치를 중심으로 r, θ, ϕ 중 한 변수씩 변화시키며 그 영향을 관찰하였다. 그림 5(a)는 $0.1 \leq r \leq 0.8$, $\theta = \theta^*$, $\phi = \phi^*$ 인 경우, 그림 5(b)는 $r = r^*$, $\theta = \theta^*$, $0 \leq \phi \leq 360^\circ$ 인 경우와 그림 5(c)는 $r = r^*$, $\phi = \phi^*$, $0 \leq \theta \leq 360^\circ$ 인 경우 Φ 를 나타낸다. 최적위치 $r^* = 0.45$, $\theta^* = 130^\circ$, $\phi^* = 130^\circ$ 를 중심으로 r 또는 θ, ϕ 가 변화할 때 Φ_{min} 는 급속히 증가하며, 예를 들면, $r = r^*$ 인 상태에서 ϕ 가 변화할 때 Φ 는 24 Nm에서 43 Nm로 증가한다. 따라서

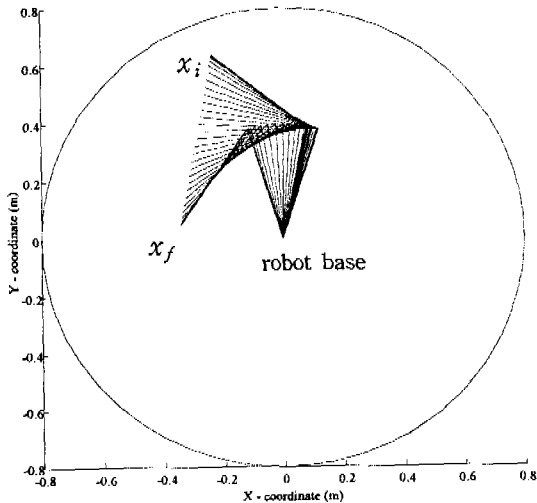


그림 4. 최적경로계획의 해. 로봇은 중력의 영향을 받고 운동하며, 위의 그림은 주어진 직선 운동 과정에서 관절 외란이 가장 적은 경로 위치를 보여준다.

관절외란을 최소화하기 위해서는 직선경로의 위치결정이 매우 중요함을 알 수 있다. 그림5의 결과는 경로의 위치 선택에 유의할 필요가 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 독립관절 제어방식인 경우의 관절외란 해석을 위해서, 로봇 동역학 식을 이용하여 관절외란을 정의하고, 중력을 받고 운동하는 2 자유도 로봇 팔에 대해서 관절외란의 식을 유도한 후 관절외란을 최소화하는 최적경로위치문제의 해를 구하였다. 이 방법은 로봇의 직교좌표상의 고정도 운동을 위해서 경로 계획단계에서 관절외란이 최소화되도록 경로의 위치를 결정하는 경로계획방법이다

제안된 최적경로위치 문제의 해법을 수직면에서 운동하는 2관절 로봇의 경우에 대하여 시뮬레이션을 이용하여 실행하였다. 대상경로가 직선이고, 직선상의 운동이 주어진 경우에 로봇의 작업공간 내에서 관절외란을 최소로 하는 최적의 경로위치를 구하였다. 대상경로의 위치변화에 대한 관절외란의 변화를 조사한 결과, 관절외란의 최대값은 경로의 위치에 따라 크게 변화함을 보였으며, 따라서 관절외란의 최소화를 고려한 최적경로위치문제의 중요성을 보였다.

참고문헌

[1] C. H. An, et al, "Model Based Control of a Robot manipulator," The MIT Press, 1988.

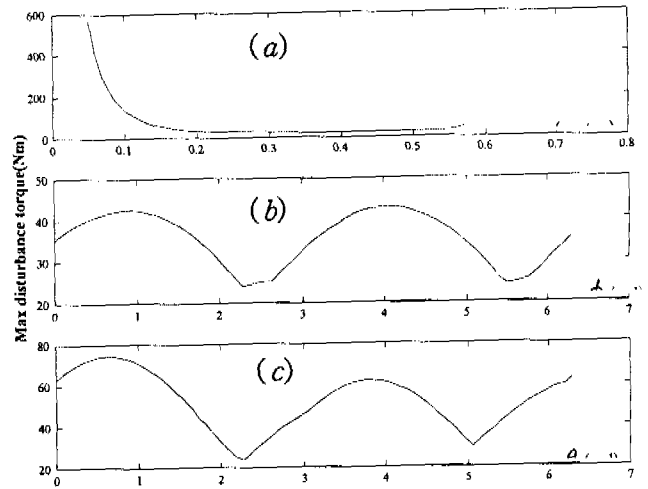


그림 5. 최적경로를 중심으로한 경로위치 변화에 따른 관절 외란의 변화

[2] K. S. Fu, R. C. Gonzalez, and C. S. G. Lee, "Robotics: Control, Sensing, Vision and Intelligence," McGraw-Hill, 1988.

[3] E. Freund, "Fast Nonlinear Control with Arbitrary Pole - Placement for Industrial Robots and Manipulators," Int. J. Robotics Research, Vol.1, No.1, pp.65-78, 1982.

[4] Gilbert, E.G. and Ha, I.J., "An approach to nonlinear feedback control with applications to robotics," IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, SMC-14, pp.879-884, 1984

[5] Kosla, P.K. and Kanade, T, "Real-time Implementation and Evaluation of Model based Controls on CMU DD Arm II, Proc. IEEE Int Conf. Robotics and Automation, pp.1546-1555, 1986

[6] S. Dubowsky and D. T. DesForges, "The Application of Model-Referenced Adaptive Control to robotics manipulators," J. Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.101, pp.193-200, 1979.

[7] T. C. Hsia, "Adaptive Control of Robot Manipulators - A Review," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, San Francisco, pp.183-189, 1986.

[8] Nelson, Pedersen, Donath, "Locating assembly tasks in a manipulators work space ", Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1367-1372, 1987

[9] Hemmerle, Printz, "Optimal Path Placement for Kinematically Redundant manipulators", Proc. IEEE Int Conf. on Robotics and Automation, pp.1234-1244, 1991