

독립관절제어 로봇의 관절외란해석과 최적경로위치 문제의 해법

Joint Disturbance Torque Analysis for Independent Joint Controlled Robots and Its Application in Optimal Path Placement

최 명 환
(Myoung Hwan Choi)

Abstract : A majority of industrial robots are controlled by a simple joint servo control of joint actuators. In this type of control, the performance of control is greatly influenced by the joint interaction torques including Coriolis and centrifugal forces, which act as disturbance torques to the control system. As the speed of the robot increases, the effect of this disturbance torque increases, and hence makes the high speed - high precision control more difficult to achieve. In this paper, the joint disturbance torque of robots is analyzed. The joint disturbance torque is defined using the coefficients of dynamic equation of motion, and for the case of a 2 DOF planar robot, the conditions for the minimum and maximum joint disturbance torques are identified, and the effect of link parameters and joint variables on the joint disturbance torque are examined. Then, a solution to the optimal path placement problem is proposed 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 a class of robots that are controlled by independent joint servo control, which includes the vast majority of industrial robots.

Keywords: joint servo control, joint disturbance torque, optimal path placement, path tracking, Cartesian motion

I. 서론

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 다변수제어 방식에 대한 대표적인 연구로는 모델에 기초한 계산토크 방법(model based computed torque method)[3][4][5], 적응 제어기법[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 독립적인 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 증가할수록 관절외란의 영향이 증가하여 제어성능은 저하된다.

상업용 로봇의 고속, 고정확도 운동의 필요성이 증가할수록 실용적인 고성능 제어기법의 필요성 역시 증가한다. 이러한 관점에서 독립관절제어기법의 개선에 대한 연구가 진행되어 왔다. 최근의 접근방법의 하나는 외란 관측기를 이용하는 기법이다[8]-[13]. 이 접근방법은 관절제어시스템의 고정된 대표모델(nominal model)을 가정하고, 관절외란 관측기(joint disturbance observer)를 이용하여 관절관성의 변화와 동역학 파라미터의 변화, 관절간의 간섭 등에 의해 발생한 관절외란을 추정한다. 이 추정값은 제어입력을 수정하여 실제 관절의 운동이 대표모델처럼 반응하도록 이용된다.

외란관측기 기법은 관절외란을 미지의 값으로 가정하고 이를 추정한다. 관절외란 관측기의 개념은 그 원리에 있어서 모터의 서보제어에 사용되는 외란관측기의 개념과 동일하다. 그러나, 일반적인 모터 서보제어의 경우와는 달리, 로봇 제어시스템에서의 관절외란은 미지의 값이 아니며, 그 값은 마찰력과 점성계수에 의한 영향을 무시한다면 로봇 동역학 운동식에 의해 정확히 기술된다. 관절외란 관측 시 로봇동역학 식을 무시하고 관절외란이 미지의 값으로 간주되는 이유는 동역학 파라미터의 값을 사용하지 않고 로봇을 제어하는 것이 목표이기 때문이다. 그럼에도 불구하고, 로봇 동역학 운동식은 관절외란의 특성을 설명하며, 따라서 대다수의 로봇제어기가 독립관절제어기인 현실에 비추어 볼 때 관절외란의 특성은 깊이 연구될 필요가 있다.

관절외란은 그 특성상 빠른 관절운동 시에 그 영향이

접수일자 : 1997. 8. 18., 수정완료 : 1998. 4. 25.

최명환 : 강원대학교 제어계측공학과

* 본 논문은 정보통신부 정보통신연구관리단에서 지원하여 연구하였습니다.

크며, 정지 시에는 중력의 영향을 제외하면 존재하지 않는다. 로봇의 PTP (point-to-point) 운동에서는 목표점에서의 정확한 정지위치가 관심의 대상이며, 중간 경로상의 정확한 위치는 관심의 대상이 아니다. 반면, 직교좌표 공간(Cartesian space)의 운동, 예를 들면, 직선운동의 경우, 관절운동 시에 발생하는 관절외란은 관절위치명령의 추적오차(tracking error)를 발생시키며 이는 직선경로상의 추적오차로 나타난다. 관절서보제어기의 관절외란 제거능력이 클수록 이 추적오차의 크기는 감소하지만, 로봇의 고속운동의 경우 짧은 운동시간에 관절외란이 크게 변화하므로, 관절외란에 의한 추적오차는 효과적으로 제거되기 어려우며, 이 영향은 궤적추적오차로 나타난다. 따라서 독립관절 제어방식의 경우에 직교좌표공간에서 고정도(high precision)운동을 위해서는 궤적계획단계에서 관절외란이 최소화 되도록 고려하여야 한다.

로봇의 최적경로위치(optimal path placement)문제는 주어진 로봇의 작업영역 내에서의 로봇경로의 위치결정과 관련된 문제이다. 로봇의 작업, 예를 들면 조립작업, 이 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 따라 더 효율적인 운동이 발생 할 수 있다. 작업물의 위치결정을 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[14]과 로봇관절운동을 최소화하며 관절위치가 관절위치영역의 중앙에 가깝도록 조립물의 위치를 결정하는 방법[15] 등이 있다.

본 논문에서는 독립관절 제어방식인 경우의 관절외란 해석을 위해서, 로봇 동역학 식을 이용하여 관절외란을 정의하고, 2자유도 로봇 팔에 대해서 관절외란의 식을 유도한 후 최대관절외란의 조건과 관절외란에 대한 링크 파라미터의 영향을 분석한다. 또한, 로봇의 최적경로위치문제의 해법으로 관절외란을 최소화하는 방법을 제안한다. 이 방법은 로봇의 직교좌표상의 고정도 운동을 위해서 경로계획단계에서 관절외란이 최소화되도록 경로의 위치를 결정하는 경로계획방법이다. 제안된 최적경로위치문제의 해법을 평면형 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.

II. 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 $n \times 1$ 코리올리 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 되며, 이러한 고정된 모델과 (1)의 실제 로봇동역학 모델과의 차이, 즉, 관절의 운동으로 발생하는 관성의 변화와 코리올리, 원심력, 중력의 영향들은 관절제어시스템에 포함되는 관절외란으로 간주한다. 이상과 같이 로봇을 n 개의 독립적인 관절제어시스템으로 본다면, 로봇 동역학(1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

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

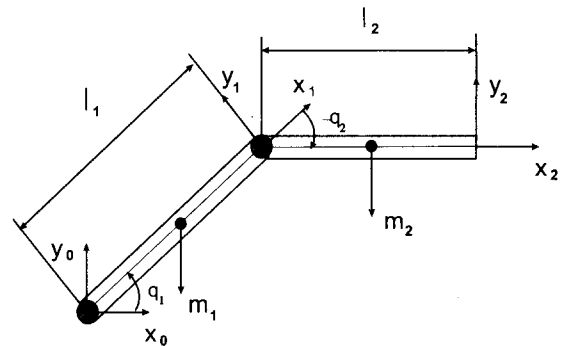


그림 1. 2자유도 로봇팔의 단순화된 모델.

Fig. 1. A simplified model of 2 DOF robot.

여기서,

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

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

정의에 의해서 \hat{D}_{ii} 는 관절위치, 속도, 가속도에 영향을 받지 않는다. 이 값을 관절 i의 대표관성부하(nominal inertial load)로 정의하자. 위의 (4)에서 τ_{di} 는 i번째 관절에 작용하는 관절외란으로서, 타 관절의 가속, 관성변화와 코리올리, 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 1에 있다. 문제를 단순화하고 관절사이의 간섭을 명확히 하기 위해서 로봇 팔은 수평면에서 운동한다고 가정한다. 따라서 중력가속도는 영(zero)으로 가정한다. 또한 링크는 균일한 질량분포를 갖는다고 가정한다. 그림에서 m_i, l_i, q_i 는 각각 i번째 링크의 질량, 길이, 관절위치이다. 이 로봇 팔의 Lagrange-Euler 운동

식을 쓰면 다음과 같다[2].

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

이때,

$$D_{11} = (1/3)m_1 l_1^2 + (1/3)m_2 l_2^2 + m_2 l_1^2 + m_2 l_1 l_2 C_2$$

$$D_{12} = (1/3)m_2 l_2^2 + (1/2)m_2 l_1 l_2 C_2$$

$$D_{21} = D_{12}$$

$$D_{22} = (1/3)m_2 l_2^2$$

$$h_1 = -(1/2)m_2 l_1 l_2 S_2 (2 \dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dot{q}_2^2)$$

$$h_2 = (1/2)m_2 l_1 l_2 S_2 \dot{q}_1^2$$

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

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

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

$$\tau_{d1} = \alpha \ddot{q}_2 + \beta R_1(\ddot{q}_1, \ddot{q}_2, \dot{q}_1, \dot{q}_2) \cos(q_2 - \phi_1) \quad (8)$$

$$\tau_{d2} = \alpha \ddot{q}_1 + \beta R_2(\ddot{q}_1, \dot{q}_1) \cos(q_2 - \phi_2) \quad (9)$$

이때,

$$\alpha = (1/3)m_2 l_2^2$$

$$\beta = (1/2)m_2 l_1 l_2$$

$$R_1(\ddot{q}_1, \ddot{q}_2, \dot{q}_1, \dot{q}_2) = [(2 \ddot{q}_1 + \ddot{q}_2)^2 + (2 \dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dot{q}_2^2)^2]^{1/2}$$

$$R_2(\ddot{q}_1, \dot{q}_1) = [\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1^4]^{1/2}$$

$$\phi_1 = \text{atan2} [-(2 \dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dot{q}_2^2), (2 \ddot{q}_1 + \ddot{q}_2)] \quad (10)$$

$$\phi_2 = \text{atan2} [\dot{q}_1^2, \dot{q}_1]$$

III. 관절외란식의 특성분석

위의 II장에서 유도한 관절외란식 (8), (9)의 특성을 분석한다. 단, 로봇이 수평면상에서 운동한다는 가정을 전제하였다. 관절위치, 속도, 가속도의 범위가 다음과 같다고 하자.

$$-q_{i, \max} \leq q_i \leq q_{i, \max}$$

$$-\dot{q}_{i, \max} \leq \dot{q}_i \leq \dot{q}_{i, \max} \quad (11)$$

$$-\ddot{q}_{i, \max} \leq \ddot{q}_i \leq \ddot{q}_{i, \max}, \quad i=1, 2$$

최대 τ_{d1} 의 조건 : (8)에서 $R_1(\ddot{q}_1, \ddot{q}_2, \dot{q}_1, \dot{q}_2)$ 와 \ddot{q}_2 이 각각 최대값을 갖고, $\cos(q_2 - \phi_1)$ 이 1일 때, τ_{d1} 의 값은 최대이다. 따라서, 조건식 (11)에서부터 다음의 3가지 조건이 만족될 때 τ_{d1} 은 최대값 $\tau_{d1, \max}$ 을 갖는다.

1. $\ddot{q}_1 = \ddot{q}_{1, \max}$ and $\ddot{q}_2 = \ddot{q}_{2, \max}$
2. ($\dot{q}_1 = \dot{q}_{1, \max}$ and $\dot{q}_2 = \dot{q}_{2, \max}$) or ($\dot{q}_1 = -\dot{q}_{1, \max}$ and $\dot{q}_2 = -\dot{q}_{2, \max}$)
3. $q_2 = \text{atan2} [-(2 \dot{q}_{1, \max} \dot{q}_{2, \max} + \dot{q}_{2, \max}^2),$

$$(2 \ddot{q}_{1, \max} + \ddot{q}_{2, \max})] \quad (12)$$

이때, $\tau_{d1, \max}$ 는 다음으로 주어진다.

$$\tau_{d1, \max} = \alpha \ddot{q}_{2, \max} + \beta R_{1, \max} \quad (13)$$

$$R_{1, \max} = [(2 \ddot{q}_{1, \max} + \ddot{q}_{2, \max})^2 + (2 \dot{q}_{1, \max} \dot{q}_{2, \max} + \dot{q}_{2, \max}^2)^2]^{1/2} \quad (14)$$

최소 τ_{d1} 의 조건 : (8)에서 $R_1(\ddot{q}_1, \ddot{q}_2, \dot{q}_1, \dot{q}_2)$ 이 최대 값을 갖고, \ddot{q}_2 이 최소값, $\cos(q_2 - \phi_1)$ 이 -1 일 때, τ_{d1} 의 값은 최소이다. 따라서, 다음의 3가지 조건이 만족될 때 τ_{d1} 은 최소값 $\tau_{d1, \min}$ 을 갖는다.

1. $\ddot{q}_1 = -\ddot{q}_{1, \max}$ and $\ddot{q}_2 = -\ddot{q}_{2, \max}$
2. ($\dot{q}_1 = \dot{q}_{1, \max}$ and $\dot{q}_2 = \dot{q}_{2, \max}$) or ($\dot{q}_1 = -\dot{q}_{1, \max}$ and $\dot{q}_2 = -\dot{q}_{2, \max}$)
3. $q_2 = \pi + \text{atan2} [-(2 \dot{q}_{1, \max} \dot{q}_{2, \max} + \dot{q}_{2, \max}^2),$

$$-(2 \ddot{q}_{1, \max} + \ddot{q}_{2, \max})] \quad (15)$$

이때 $\tau_{d1, \min}$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\tau_{d1, \min} = -\tau_{d1, \max} \quad (16)$$

최대 τ_{d2} 의 조건 : (9)에서 \ddot{q}_1 과 $R_2(\ddot{q}_1, \dot{q}_1)$ 이 각각 최대값을 갖고, $\cos(q_2 - \phi_2)$ 이 1 일때, τ_{d2} 의 값은 최대이다. 따라서, 다음의 3가지 조건이 만족될 때 τ_{d2} 는 최대값 $\tau_{d2, \max}$ 을 갖는다.

1. $\ddot{q}_1 = \ddot{q}_{1, \max}$
2. $\dot{q}_1 = \dot{q}_{1, \max}$ or $\dot{q}_1 = -\dot{q}_{1, \max}$
3. $q_2 = \text{atan2} [\dot{q}_{1, \max}^2, \dot{q}_{1, \max}] \quad (17)$

이때, $\tau_{d2, \max}$ 는 다음으로 주어진다.

$$\tau_{d2, \max} = \alpha \ddot{q}_{1, \max} + \beta R_{2, \max} \quad (18)$$

$$R_{2, \max} = (\dot{q}_{1, \max}^2 + \dot{q}_{1, \max}^4)^{1/2} \quad (19)$$

최소 τ_{d2} 의 조건 : (9)에서 \ddot{q}_1 과 $R_2(\ddot{q}_1, \dot{q}_1)$ 이 각각 최소값을 갖고, $\cos(q_2 - \phi_2)$ 이 -1 일때, τ_{d2} 의 값은 최소이다. 다음의 3가지 조건이 만족될 때 τ_{d2} 은 최소 값 $\tau_{d2, \min}$ 을 갖는다.

1. $\ddot{q}_1 = -\ddot{q}_{1, \max}$
2. $\dot{q}_1 = \dot{q}_{1, \max}$ or $\dot{q}_1 = -\dot{q}_{1, \max}$
3. $q_2 = \pi + \text{atan2} [\dot{q}_{1, \max}^2, -\dot{q}_{1, \max}] \quad (20)$

이때, $\tau_{d2, \min}$ 는 다음으로 주어진다.

$$\tau_{d2, \min} = -\tau_{d2, \max} \quad (21)$$

관절외란식 (8), (9)를 분석하면 다음과 같은 특성을 관찰할 수 있다. 관절 1의 외란, τ_{d1} 는 $m_2, l_1, l_2, q_2, \dot{q}_1, \dot{q}_2, \ddot{q}_1, \ddot{q}_2$ 의 함수로 주어지며, 관절 2의 외란 τ_{d2} 는 $m_2, l_1, l_2, q_2, \dot{q}_1, \ddot{q}_1$ 의 함수로 주어진다. 주목할 점

은 τ_{d1} 은 m_1, q_1 와 무관하며, τ_{d2} 는 $m_1, q_1, \dot{q}_2, \ddot{q}_2$ 와 무관하다. 링크 1의 질량 m_1 와 관절 1의 위치 q_1 는 관절외란 τ_{d1} 과 τ_{d2} 에 전혀 영향을 주지않는다. τ_{d1} 는 관절 1과 2의 속도와 가속도에 의해 영향을 받지만, τ_{d2} 는 관절 1의 속도와 가속도에 의해서 영향을 받는다. 반면, 관절 2의 속도와 가속도에 의한 영향은 없다. τ_{d1} 과 τ_{d2} 는 m_2 에 정비례하며, q_2 에 의해 영향을 받는다. $\tau_{d1, max}$ 과 $\tau_{d2, max}$ 는 q_2 에 의존하지 않는다. 여기서 주의할 점은, 위의 결과는 2 관절 수평 로봇팔에 대한 결과이며, 관절의 수가 증가하면, 관절외란의 형태는 변화한다. 최대 및 최소 τ_{d1} 조건의 물리적인 의미는 두 관절이 동시에 양방향 또는 음방향으로 최대속도로 운동하면서 두 관절의 가속도 값이 동시에 양방향으로 또는 동시에 음방향으로 작용하는 상태를 말한다. q_2 의 조건은 최대 및 최소 관절외란이 발생하는 특정한 q_2 값이 존재함을 의미한다. 최대 및 최소 τ_{d2} 조건의 물리적인 의미는 관절 1이 양방향 또는 음방향으로 최대속도로 운동하며, 관절 1의 가속도가 양방향 또는 음방향으로 최대값을 갖는 경우를 의미한다.

IV. 최소관절외란을 위한 최적경로위치 문제

로봇을 독립관절 제어방식으로 제어할 때, 관절외란은 각 관절의 궤적추적오차를 유발한다. 이 오차는 관절제어기의 외란제거능력에 의해 결정된다. 예를 들면, 적분제어기를 사용하면, $t \rightarrow \infty$ 고정외란(constant disturbance)에 대한 정상상태 오차(즉, 인 경우)는 제로로 만들 수 있다. 그러나 고속 로봇운동의 경우, 관절외란은 짧은 시간 동안에 변화하기 때문에 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 직선 경로상의 추적오차(tracking error)로 나타난다. 따라서, 직교좌표공간에서 고속 고정도 운동을 위해서는 경로계획단계에서 운동 중에 발생하는 관절외란이 최소가 되도록 고려하여야 한다.

직교좌표공간에서 로봇이 직선운동을 해야하는 경우를 생각해보자. 그림 1에 2 관절 평면형 로봇의 예가 나타나 있다. 수행할 작업에 필요한 직선경로가 정해지고, 직선 상에서의 공구의 궤적도 수행할 작업의 성격에 따라 그림 2와 같이 정해졌다고 가정하자. 그림 3은 로봇의 작업공간을 보여준다. 로봇의 작업공간 내에서 같은 길이의 경로 A와 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[14][15].

본 연구에서는 로봇의 직교좌표공간상의 고정도 운동을 위해서 직선운동계획 시에 직선운동 중의 관절외란을 최소화하는 최적경로위치문제의 해법을 제안한다. 직선

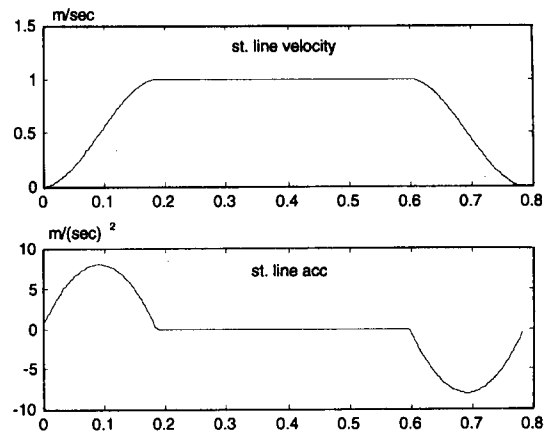


그림 2. 직선운동 속도 및 가속도 형태. 이동거리 0.6 meter, 최대속도 1 (m/sec).

Fig 2. Velocity and acceleration profile for straight line motion: distance 0.6 meter, max vel 0.6 m/sec.

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 (8),(9)에서 주어진다. 경로 성능지수 Φ 를 직선경로상의 운동시에 발생하는 최대 $\|\tau_d\|$ 값으로 정하면, 아래와 같이 표현된다.

$$\Phi = \max_{0 \leq t \leq t_f} \|\tau_d\| \quad (22)$$

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 r방향과 직선의 사이각을 나타낸다. 로봇의 작업공간을 S라고 하고, 직선의 길이를 d 라고 하자. $\theta=0$ 으로 놓고, $\Delta r > 0$ 와 $\Delta \phi > 0$ 를 선정한 다음, 직선의 중앙점 (x_c, y_c) 를 로봇의 베이스에서부터 Δr 간격으로 이동시키며, 직선의 방향은 $\Delta \phi$ 간격으로 회전시키며 경로성능지수 Φ 를 구하여, 최소값 Φ 에 해당하는 경로를 찾는다. 이 경우, 해의 정확도는 $\Delta r, \Delta \phi$ 의 크기에 의존하며, 이들의 값이 작을 때 계산부하가 증가하지만, 이 문제는 Off-line 계산으로 해결 할 수 있으므로 계산시간은 크게 문제되지 않는다. $0 \leq \phi \leq \pi$ 인 경우와 $\pi \leq \phi \leq 2\pi$ 인 경우의 직선 경로상의 운동은 서로 대칭이므로 $0 \leq \phi \leq \pi$ 의 범위만 조사한다. 본 논문의 대상인 2 DOF 평면형 로봇의 경우 중력의 영향을 고려하지 않으므로 θ 의 변화는 로봇의 관절토크에 영향을 주지 않으며, 따라서 θ 는 고려하지 않는다. 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.

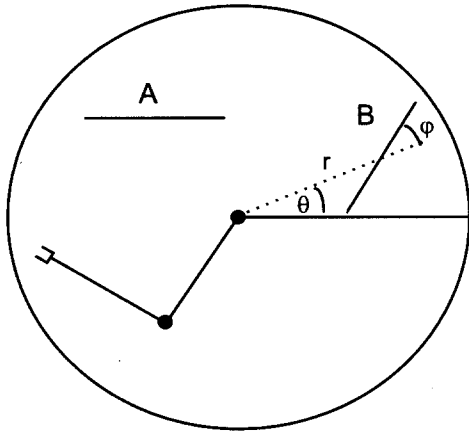


그림 3. 경로위치결정문제의 예시. A와 B는 같은 길이의 직선 경로이며, 작업공간 내의 위치만 다르다.

Fig. 3. An example of trajectory placement problem. A and B are the same straight line path except for the location in the workspace.

최적경로위치 알고리즘

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

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

$$\begin{bmatrix} x_f \\ y_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \\ 0 \end{bmatrix} + Rot(z, \phi) \begin{bmatrix} d/2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

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),(22).
6. If $\Phi < \Phi_{\min}$

$$r_{\min} = r, \phi_{\min} = \phi, \Phi_{\min} = \Phi$$

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. The optimal solution is given by the path from $(x_{i, \min}, y_{i, \min})$ to $(x_{f, \min}, y_{f, \min})$

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

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

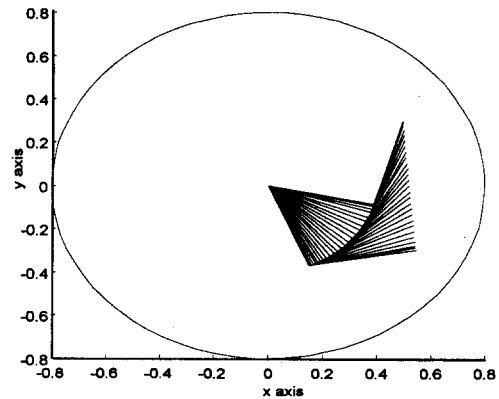


그림 4. 최소관절외란을 갖는 최적경로문제의 해.
 Fig. 4. Solution of the optimal path placement problem.

V. 시뮬레이션 결과

위의 IV절에서 설명한 최소관절외란을 위한 최적경로 위치 알고리즘을 그림 1의 2관절 평면형 로봇의 경우에 적용한 결과를 다음에 제시한다. (22)의 $\|\tau_d\|$ 로는 2-norm, 즉 $\|\tau_d\|_2 = [\tau_{d1}^2 + \tau_{d2}^2]^{1/2}$ 을 사용하였고, 직선 경로상의 속도 및 가속도는 그림 2와 같이 사용하였으며, 시뮬레이션에서 사용한 파라미터는 아래와 같다.

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

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

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

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

이상의 방법으로 구한 최적경로에 해당하는 파라미터는 $r^* = 0.52, \phi^* = 95^\circ$ 이며, 최소 경로성능지수 Φ_{\min} 는 8.92 Nm 값을 갖는다. $\theta = 0$ 인경우의 경로가 그림 4에 나타나 있다. 이 경로는 로봇작업영역내의 직선경로 중에서 그림 2에서 지정된 직선경로상의 운동을 수행하면서 관절외란의 최대값이 가장 작은 경로를 보여준다. 위의 최적경로위치는 $0 \leq r \leq (l_1 + l_2), 0 \leq \phi \leq 180^\circ$ 의 범위에서는 유일하게 결정되었으며, 이와 대칭인 경로, 즉, $r^* = 0.52, \phi^* = 95 + 180^\circ$ 경우에도 동일한 관절외란 값을 갖는다. θ 의 값은 관절외란과 무관하므로 어떤 값을 가져도 최적경로가 될 수 있다. 따라서 최적경로위치의 유형은 로봇의 작업공간 내에서 유일하게 결정되며, 이 유형의 여러 다른 경우가 존재한다고 할 수 있다. 다만 이 결과는 로봇팔이 평면형이고 중력의 영향이 없는 경우의 결과이며, 로봇의 운동이 중력의 영향을 받는 경우는 θ 의 값에 의해서 관절외란 값이 영향을 받는다. 그림 5는 이 최적경로의 운동에 따른 $\|\tau_d\|, \tau_{d1}, \tau_{d2}$ 를 보여준다. 관절외란은 가속 및 감속구간에서 높은 값을 가지며, 등속구간에서는 비교적 작은 값을 갖는다.

다음은 경로위치의 변화에 대한 관절외란의 변화를 조사하기 위해 위의 최적경로위치를 중심으로 r, ϕ 중 한 변수씩 변화시키며 그 영향을 관찰하였다. 그림 6은

$0.1 \leq r \leq 0.8$, $\phi = \phi^*$ 인 경우와 $r = r^*$, $0 \leq \phi \leq 180^\circ$ 인 경우의 Φ 를 나타낸다. 그림 6의 두 그림은 앞서 설명한대로 최적경로위치가 유일하게 결정됨을 보여준다. 최적위치 $r^* = 0.52$, $\phi^* = 95^\circ$ 를 중심으로 r 또는 ϕ 가 변화할 때 Φ_{min} 는 급속히 증가하며, 예를 들면, $r = r^*$ 인 상태에서 ϕ 가 95도(1.66 rad)에서 45도(0.79 rad)로 변화할 때 Φ 는 8.92 Nm에서 28.2 Nm로 316% 증가한다. 따라서 관절외란을 최소화하기 위해서는 직선경로의 위치결정이 매우 중요함을 알 수 있다. 그림 6의 결과는 ϕ 에 대한 Φ 의 변화는 r 에 대한 Φ 의 변화보다 더 크다는 점을 보여주며, 경로의 위치 선택 시에 ϕ 의 선택에 유의할 필요가 있음을 알 수 있다.

위의 시뮬레이션에서 사용한 $\|\tau_d\|_2 = [\tau_{d1}^2 + \tau_{d2}^2]^{1/2}$ 는 관절외란벡터의 2-노름(2-norm)을 이용한 것으로서 관절외란벡터의 크기를 최소화하는 관점에서 사용되었다. 그러나, 필요에 따라 다른 형태의 노름을 사용할 수도 있으며, 예를 들면, 다음의 노름을 사용할 수도 있다.

$$\|\tau_d\|_\infty = \max[|\tau_{d1}|, |\tau_{d2}|]$$

$$\|\tau_d\|_1 = [|\tau_{d1}| + |\tau_{d2}|]$$

본 논문에서 제안된 관절외란의 해석과 최적경로위치 문제의 해법은 평면형 2관절 로봇의 경우에 대해서 설명하였으나, 중력이 작용하는 경우, 예를 들면, 수직평면에서 동작하는 2관절 로봇의 경우 또는 수직다관절형 로봇의 일반적인 경우에도 로봇동역학식에서 중력의 영향을 포함시켜 같은 방법으로 적용 될 수 있다. 다만 이 경우에 검색공간이 앞의 (r, θ, ϕ) 의 3차원공간이 아니라 더 큰 차원의 공간이 될 수 있으며, 검색방법이 격자탐색방법이므로 계산시간이 증가 할 수 있다. 그러나 최적경로 위치문제는 on-line 문제이므로 계산시간은 문제가 되지 않을 것이다.

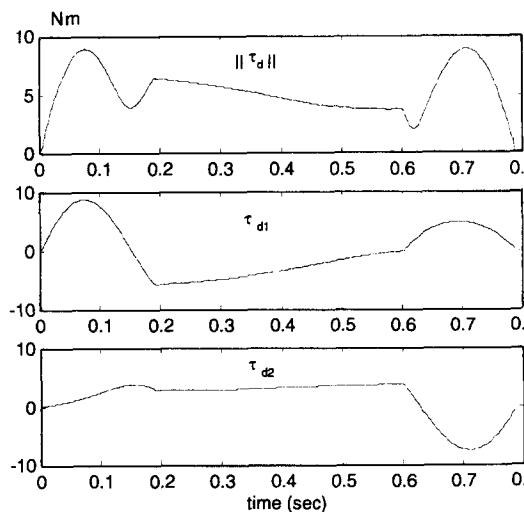


그림 5. 최적경로상의 운동에 대한 관절외란의 변화.
Fig. 5. Joint disturbance torque variation along the optimal path motion.

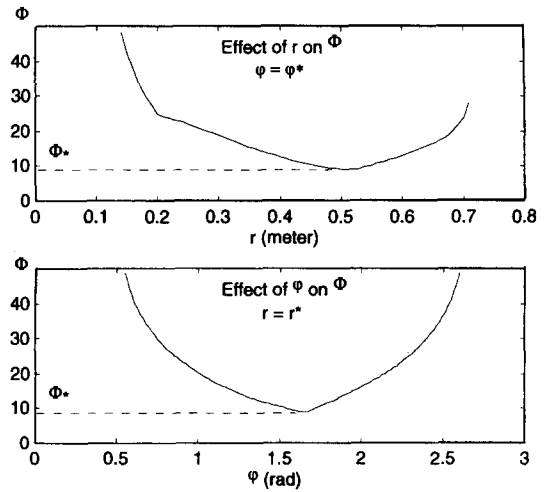


그림 6. 최적경로를 중심으로한 경로위치 변화에 대한 관절외란의 변화.
Fig. 6. Variation of the joint disturbance torque upon the variation of the path around the optimal solution.

VI. 결론

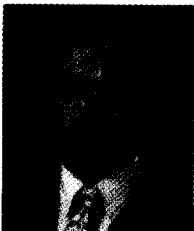
본 논문에서는 독립관절 제어방식인 경우의 관절외란 해석을 위해서, 로봇 동역학 식을 이용하여 관절외란을 정의하고, 2 자유도 로봇 팔에 대해서 관절외란의 식을 유도한 후 최대관절외란의 조건과 관절외란에 대한 링크 파라미터의 영향을 분석하였다. 또한, 로봇의 최적경로 위치 문제의 해법으로 관절외란을 최소화하는 방법을 제안하였다. 이 방법은 로봇의 직교좌표상의 고정도 운동을 위해서 경로계획단계에서 관절외란이 최소화되도록 경로의 위치를 결정하는 경로계획방법이다

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

참고문헌

[1] C. H. An, et al., *Model Based Control of a Robot Manipulator*, The MIT Press, 1988.
 [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] E. G. Gilbert and I. J. Ha, "An approach to

- nonlinear feedback control with applications to robotics," *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics*, SMC-14, pp. 879-884, 1984.
- [5] P. K. Kosla and T. Kanade, "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*, pp. 183-189, 1986.
- [8] M. Nakao et al., "A robust decentralized joint control based on interference estimation," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, vol. 1, pp. 326-331, 1987.
- [9] C. Y. Kou and S. P. T. Wang, "Robust position control of robotic manipulator in cartesian coordinates," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 7, no. 5, pp. 653-659, 1991
- [10] T. Umeno, T. Kaneko and Y. Hori, "Robust servo system design with two degrees of freedom and its application to novel motion control of robot manipulators," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 40, no. 5, pp. 473-485, 1993.
- [11] S. Lee, *Robust Digital Tracking Controllers for High-Speed/High Accuracy Positioning System*, Ph.D. Dissertation, U.C. Berkeley, 1994.
- [12] K. Kaneko et al., "Manipulator control based on a disturbance observer in the operational space," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, vol. 2, pp. 902-909, 1994.
- [13] 서일홍, 엄광식, 권기호, "외란관측기를 이용한 직접 구동형 로봇의 고속 고정도 제어," *Proc. 11th KACC*, pp. 948-951, 1996.
- [14] B. Nelson, K. Pedersen, M. Donath, "Locating assembly tasks in a manipulators work space," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1367-1372, 1987.
- [15] J. S. Hemmerle, F. B. Printz, "Optimal path placement for kinematically redundant manipulators," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1234-1244, 1991.



최 명 환

1986년 서울대 제어계측공학과 졸업.
 동대학원 석사(1988), 동대학원 박사
 (1992). 1992년~현재 강원대학교 제
 어계측공학과 교수. 1996년~1997 미
 국 ORNL 국립연구소 객원연구원.
 관심분야는 산업용로봇제어, 로봇교
 시, 다중협력로봇제어, 로봇힘제어, 생산자동화.