

여유자유도 로봇의 관절외란최소화를 이용한 궤적계획
Trajectory planning for redundant robot
by joint disturbance torque minimization

최명환**, °최병진*

**강원대학교 제어계측공학과(Tel: +82-361-250-6345; Fax: +82-361-242-2059; E-mail: mhchoi@cc.kangwon.ac.kr)

*강원대학교 제어계측공학과(Tel: +82-361-242-1466; Fax: +82-361-242-2059; E-mail: bzchoi@pine.kangwon.ac.kr)

Abstract This paper proposed an efficient optimization technique to resolve redundancy and a trajectory planning for a high precision control using proposed optimization technique. The proposed technique is the joint disturbance torque optimization considering redundancy in the joint servo control. Joint disturbance torque should be minimized to highly precision control robot manipulators. In a robot manipulator the joint disturbance torque is not unknown, it is described dynamic equation ignored friction and viscosity. The proposed technique is used the dynamic equation included the joint disturbance torque characteristics. Numerical example of 3 joint planar redundant robot manipulator is simulated. In the 2-norm minimization of joint disturbance torque we compared pseudoinverse local optimization with proposed technique, and the results showed better the proposed technique. So the proposed technique can be highly precision controlled redundant robot manipulators in the joint servo control.

KeyWords Joint servo control, Redundancy resolution, Disturbance torque, Pseudo-inverse, Local optimization

1. 서론

로봇 팔의 운동제어는 오랫동안 많은 연구의 대상이 되어왔다. 로봇제어에 대한 많은 연구들은 편의상 다변수제어방식과 독립관절제어방식으로 분류해 볼 수 있다.

다변수 제어방식은 로봇의 동역학운동식을 기반으로 제어법칙을 적용하는 방법[1]으로써 동역학 파라미터를 정확히 측정 또는 추정하기가 어렵고, 캘리브레이션 방식은 많은 계산량을 필요로 하며, 또한 이러한 제어기법들이 동역학 파라미터의 오차에 민감하여, 실제로 적용하는데는 어려움이 따른다.

독립관절제어방식은 로봇의 각 관절을 서로 독립적인 선형시스템으로 가정하며, 타 관절의 운동으로 인해 발생하는 힘, 관성의 변화와 코리올리스, 원심력, 중력 등의 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 제어기와 그에 따른 제어기법의 필요성 역시 증가하고 있다. 이러한 시점에서 산업용 로봇에 널리 사용되고 있는 독립관절제어기법의 개선에 대한 연구가 진행되어 왔다. 최근의 접근방법중 하나는 외란 관측기를 이용하는 기법이다[14]. 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 추정 값은 제어입력을 수정하여 실제 관절의 운동이 대표모델처럼 반응하도록 이용된다. 이 때 관절외란은 미지의 값으로 가정하고, 이를 추정한다.

로봇 제어시스템에서의 관절외란은 외란 관측기에서와 같이 미지의 값이 아니며, 그 값은 마찰력과 점성계수에 의한 영향을 무시한다면 로봇 동역학 운동식에 의해 정확히 기술된다[15]. 관절외란은 그 특성상 빠른 관절운동시에 그 영향이 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, 직교좌표공간(Cartesian space)의 운동, 예를 들면, 직선운동의 경우, 관절운동시에 발생하는 관절외란은 관절위치명령의 추적오차(tracking error)를 발생시키며 이는 직선경로상의 추적오차로 나타난다. 관절서보제어기의 관절외란 제거능

력이 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 궤적 계획단계에서 관절외란에 의한 추적오차가 최소가 되도록 고려하여야 한다.

여유자유도가 없는 로봇 매니플레이터는 큰 특이점 영역과 작업공간에서의 충돌 회피에 대한 제한이 있다. 반면, 기구적으로 여유자유도가 있는 로봇 매니플레이터는 여유자유도를 활용함으로써 기본적인 작업을 포함하여, 여유자유도가 없는 로봇 매니플레이터에서의 제한된 작업들을 할 수 있는 등 많은 잠재적인 이점들이 있다. 이러한 이유로 여유자유도가 있는 로봇 매니플레이터에 대한 해석이 활발히 진행되어 왔다. 이러한 여유자유도가 있는 로봇 매니플레이터의 해석은 접근방법으로 동력학적 수준에서 순시적 최적화방법(local optimization)과 통시적 최적화방법(global optimization)이 있다.

Local optimization방법에 대한 연구는 Baillieul[2], Baillieul et al[3]등은 특이성 회피를 위해 여유자유도를 이용하였으며, Hanafusa et al[5]은 장애물 회피를 위한 최적 관절속도를 구하였고, Klein과 Huang[8]은 pseudo-inverse를 이용한 관절속도들에 대한 Euclidean norm의 최소화방법을 사용하였으며, Liegeois[9]에 의해 수정된 pseudo-inverse를 이용한 방법이 제시되었고, Hallerbach and Suh[11]는 pseudoinverse matrix와 null space vector에 weighting matrix를 사용하거나, 사용하지 않거나 하면서 관절토포크를 최소화하기 위한 여러 가지 방법들을 제안하였다. Whitney[12,13]는 작업의 실행에서 모든 순간에 대한 로봇 매니플레이터의 위치에너지의 합을 최소화하는 방법을 사용하였다.

pseudo-inverse를 이용한 방법에서 로봇에 대해 직교 좌표계에서의 end-effector의 운동에 대한 외부적인 표현법으로 jacobian 제어방법[10]에 의해 다음과 같이 jacobian matrix와 내부의 운동과의 관계로 표현됨은 잘 알려져 있다.

$$\dot{x} = J\dot{q} \quad (1)$$

여기서, \dot{q} 는 $n \times 1$ 관절속도벡터이다.

이것을 Pseudo-inverse를 이용하여 역해를 구하면 다음과 같은 결과를 알 수 있다.

$$\dot{q} = J^+ \dot{x} + (I - J^+ J)z \quad (2)$$

여기서, 첫째 항은 Jacobian 관련 least solution 과 기본해이며, 둘째 항은 Jacobian null space에서 나온 임의의 한 vector이다. 이것은 또한 여유자유도를 의미한다.

기존에 제안된 pseudo-inverse를 이용한 local optimization 방법은 식(2)에서 $z = 0$ 으로 놓으므로써 least square joint velocity vector를 구하여 joint torque의 Euclidean norm을 최소화하는 방법이다

본 논문에서는 여유자유도를 가지는 3관절 평면 로봇 매니플레이터에 있어서, [15]에서 제안한 최소관절외란법을 이용하여 관절외란 토크의 Euclidean norm을 최소화함으로써, 역기구학의 해와 궤적계획을 다루는 방법을 제안한다.

관절외란 토크의 Euclidean norm을 최소화하는 방법에서, pseudo-inverse를 이용한 local optimization 방법과 제안된 방법을 비교할 때 제안된 여유자유도를 이용한 최소관절외란법의 해로 얻어진 관절외란 토크가 pseudo-inverse를 이용한 local optimization 방법으로 얻어진 관절외란 토크보다 매우 작게 나타남을 Simulation으로 보였다

그 결과 최소관절외란법에 의해 최소화된 관절외란은 독립관절제어방식을 사용하는 여유자유도 로봇의 고속, 고정도(high precision)운동제어에 기여하는 바가 크다.

2. 관절 외란식

2.1 관절외란식의 표현

일반적으로 n 관절을 가진 로봇의 동역학방정식은 다음의 Lagrange-Euler 방정식[11]으로 표현할 수 있다.

$$\tau = D(q)\ddot{q} + H(q)\dot{q} + C(q) \quad (3)$$

이 때, τ , 는 $n \times 1$ 일반화된 토크 벡터, q 는 $n \times 1$ 관절위치 벡터, $D(q) = D_{ij}$ $n \times n$ 관성행렬, $H(q, \dot{q}) = (h_i)$ 는 $n \times 1$ 코리올리스 및 원심벡터, $C(q) = (c_i)$ 는 중력영향벡터이다.

독립관절제어법은 로봇의 각 관절을 독립적인 선형시스템으로 가정하고, 다른 관절에 의한 영향은 모두 관절외란으로 취급하기 때문에, 각 관절의 외란은 미지의 값이 아니며, 그 값은 마찰력과 점성계수에 의한 영향을 무시한다면 로봇 동역학 운동식에 의해 정확히 기술된다[15].

식(3)을 외란토크와 비외란토크항으로 분리하면[15]

$$\tau = [\hat{D}(q) + D_d(q)] \ddot{q} + H(q)\dot{q} + C(q) \quad (4)$$

여기서, $\hat{D}(q)$ 는 $n \times n$ diagonal matrix이고, 관절*i*에 대해 외란변수의 영향이 없는 대표관성[15]행렬이다. $D_d(q)$ 는 $n \times n$ matrix로 관절*i*에 대해 외란의 영향이 있는 행렬이다. 이것을 외란토크에 의한 관절외란식으로 표현하면,

$$\tau_d = D_d(q)\ddot{q} + H(q)\dot{q} + C(q) \quad (5)$$

이 때, τ_d 는 $n \times 1$ vector이며 관절외란토크이다.

2.2 여유자유도를 가진 3관절 평면 로봇에 대한 관절외란식

여유자유도가 있는 3관절 평면 로봇 매니플레이터에 대한 관절 외란을 다루어보자.

그림 1.은 여유자유도를 가진 3관절 평면 로봇의 단순화된 모델을 보인 것이다. 문제를 간단히 하기 위해 중력은 g , 질량이 균일한 링크라 하자. 이것을 식(3)과 같이 Lagrange-Euler운동 방정식을 유도한 다음 외란토크에 의한 관절외란식으로 식(4, 5)와 같이 표현하면

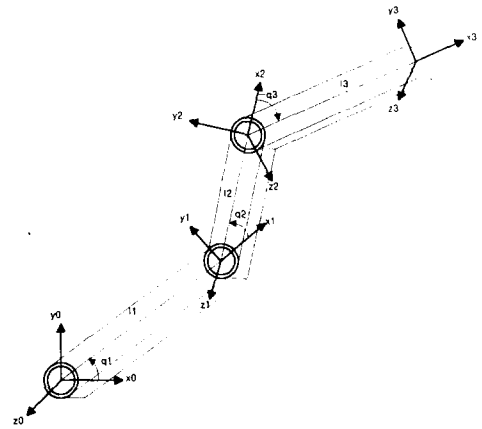


그림 1. 3관절 평면 로봇 매니플레이터
3 Joint planar robot manipulator

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{D}_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \hat{D}_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \hat{D}_{33} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{d11} & D_{d12} & D_{d13} \\ D_{d21} & D_{d22} & D_{d23} \\ D_{d31} & D_{d32} & D_{d33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \ddot{q}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} \tau_{d1} \\ \tau_{d2} \\ \tau_{d3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{d11} & D_{d12} & D_{d13} \\ D_{d21} & D_{d22} & D_{d23} \\ D_{d31} & D_{d32} & D_{d33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \ddot{q}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

이 때, D_{dij} 는 D_{ij} (단, $i \neq j$)와 같고

$$\hat{D}_{11} = ((l_1^2 m_1)/3 + l_1^2 m_2 + (l_2^2 m_2)/3 + l_1^2 m_3 + l_2^2 m_3 + (l_3^2 m_3)/3)$$

$$\hat{D}_{22} = ((l_2^2 m_2)/3 + l_2^2 m_3 + (l_3^2 m_3)/3)$$

$$\hat{D}_{33} = ((l_3^2 m_3)/3)$$

$$D_{d11} = l_1 l_2 m_2 \cos(q_2) + 2 l_1 l_2 m_3 \cos(q_2) + l_2 l_3 m_3 \cos(q_3) + l_1 l_3 m_3 \cos(q_2 + q_3)$$

$$D_{d22} = l_2 l_3 m_3 \cos(q_3)$$

$$D_{d33} = 0$$

$$D_{d12} = (l_2^2 m_2)/3 + l_2^2 m_3 + (l_3^2 m_3)/3 + (l_1 l_2 m_2 \cos(q_2))/2 + l_1 l_2 m_3 \cos(q_2) + l_2 l_3 m_3 \cos(q_3) + (l_1 l_3 m_3 \cos(q_2 + q_3))/2$$

$$D_{d13} = (l_3 m_3 (2 l_3 + 3 l_2 \cos(q_3) + 3 l_1 \cos(q_2 + q_3)))/6$$

$$D_{d21} = (l_2^2 m_2)/3 + l_2^2 m_3 + (l_3^2 m_3)/3 + (l_1 l_2 m_2 \cos(q_2))/2 + l_1 l_2 m_3 \cos(q_2) + l_2 l_3 m_3 \cos(q_3) + (l_1 l_3 m_3 \cos(q_2 + q_3))/2$$

$$D_{d23} = (l_3 m_3 (2 l_3 + 3 l_2 \cos(q_3)))/6$$

$$D_{d31} = l_3 m_3 (2 l_3 + 3 l_2 \cos(q_3) + 3 l_1 \cos(q_2 + q_3))/6$$

$$D_{d32} = (l_3 m_3 (2 l_3 + 3 l_2 \cos(q_3)))/6$$

관절외란 τ_{di} 는

$$\begin{aligned} \tau_{d1} = & (\ddot{q}_1((l_1^2 m_1)/3 + l_1^2 m_2 + (l_2^2 m_2)/3 + l_1^2 m_3 + l_2^2 m_3 + (l_3^2 m_3)/3 + l_1 l_2 m_2 \cos(q_2) + 2 l_1 l_2 m_3 \cos(q_2) + l_2 l_3 m_3 \cos(q_3) + l_1 l_3 m_3 \cos(q_2 + q_3)) - (l_1 m_1 (g_y \cos(q_1)))/2 \\ & - m_2 (g_y l_1 \cos(q_1) + (g_y l_2 \cos(q_1 + q_2))/2) \\ & - \dot{q}_1 \dot{q}_3 l_3 m_3 (l_2 \sin(q_3) + l_1 \sin(q_2 + q_3)) \\ & - \dot{q}_2 \dot{q}_3 l_3 m_3 (l_2 \sin(q_3) + l_1 \sin(q_2 + q_3)) \\ & - (\dot{q}_3^2 l_3 m_3 (l_2 \sin(q_3) + l_1 \sin(q_2 + q_3)))/2 \\ & - \dot{q}_1 \dot{q}_2 l_1 (l_2 m_2 \sin(q_2) + 2 l_2 m_3 \sin(q_2) + l_3 m_3 \sin(q_2 + q_3)) \\ & - (\dot{q}_2^2 l_1 (l_2 m_2 \sin(q_2) + 2 l_2 m_3 \sin(q_2) + l_3 m_3 \sin(q_2 + q_3)))/2 \\ & - m_3 (g_y l_1 \cos(q_1) + g_y l_2 \cos(q_1 + q_2) + (g_y l_3 \cos(q_1 + q_2 + q_3))/2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau_{d2} = & \ddot{q}_2((l_2^2 m_2)/3 + l_2^2 m_3 + (l_3^2 m_3)/3 + l_2 l_3 m_3 \cos(q_3)) - (l_2 m_2 (g_y \cos(q_1 + q_2)))/2 - (\dot{q}_1 \dot{q}_3 l_2 l_3 m_3 \sin(q_3))/2 \\ & - (\dot{q}_2 \dot{q}_3 l_2 l_3 m_3 \sin(q_3))/2 - (\dot{q}_3^2 l_2 l_3 m_3 \sin(q_3))/2 \\ & + (\dot{q}_1^2 l_1 (l_2 m_2 \sin(q_2) + 2 l_2 m_3 \sin(q_2) + l_3 m_3 \sin(q_2 + q_3)))/2 \\ & - m_3 (g_y l_2 \cos(q_1 + q_2) + (g_y l_3 \cos(q_1 + q_2 + q_3))/2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau_{d3} = & (l_3 m_3 (2 \ddot{q}_3 l_3 - 3 g_y \cos(q_1 + q_2 + q_3) + 3 \dot{q}_1^2 l_2 \sin(q_3) + 6 \dot{q}_1 \dot{q}_2 l_2 \sin(q_3) + 3 \dot{q}_2^2 l_2 \sin(q_3) + 3 \dot{q}_1^2 l_1 \sin(q_2 + q_3)))/6 \end{aligned}$$

이다.

3. 관절의란의 최소화

3.1 여유자유도의 이용

본 논문에서 제안한 독립관절제어방식에서의 관절의란식을 이용한 여유자유도 로봇의 계획적방법은 관절의란을 최소화하기 위해 제안되었다.

관절의란을 최소화하기 위해 여러 가지 방법을 사용할 수 있으나[1-14] 본 논문에서는 여유자유도가 있는 로봇의 경우 objective를 관절의란의 2-norm, $\|\tau_d\|^2 = \sqrt{\tau_{d1}^2 + \tau_{d2}^2 + \tau_{d3}^2}$, 이 최소가 되도록 하고, 이 때의 해를 구하는 방법으로 여유자유도를 이용하기로 한다. 식(2)를 다시 쓰면

$$\dot{q} = J^+ \dot{x} + Nz \quad (8)$$

이 때, N은 3 x 3 Nullspace Matrix, z는 scalar factor이다.

여유자유도가 있는 3관절 평면 로봇 매니플레이터에서 N은 rank가 1이며, vector로써 표현 가능하다. 이 vector는 여유자유도를 의미하고, 1차원인 3 x 1의 null space vector이다. 이 nullspace vector를 ψ 라고 하자. ψ 가 정해지면 scalar factor z를 변경시킴으로써 null space를 모두 탐색할 수 있다.

Nullspace vector를 구하는 방법은 식(8)에서 구한 3 x 3 Nullspace Matrix의 각 column의 2-norm을 구한 후 비교하여 normalize를 쉽게 하기 위하여 크기가 가장 큰 column vector ψ 를 선택한다.

선택한 null space vector ψ 의 2-norm이 1이 되도록 normalize한 후 normalized null space vector를 $\hat{\psi}$ 라 하자. 여유자유도를 나타내는 Normalized Nullspace vector $\hat{\psi}$ 와 scale factor z를 이용하여 식(8)을 다시 쓰면

$$\dot{q} = J^+ \dot{x} + \hat{\psi}z \quad (9)$$

$\hat{\psi}$ 에 scale factor를 변화시키면, 여유자유도에 대한 모든 관절속도를 표현할 수 있다.

scale factor z의 최소 값을 z_{min} 라하고, 최대 값을 z_{max} 하고, 미세변위를 Δz 라 하자. z를 z_{min} 에서 Δz 씩 z_{max} 로 증가시킴으로써, 선택된 하나의 normalized null space vector $\hat{\psi}$ 에 대해 $\xi = (z_{max} + z_{min})/\Delta z + 1$ 개의 관절속도의 값이 식(9)에 의해 얻어진다. 얻어진 관절속도의 값을 식(5)에 대입하여 관절의란의 2-norm이 최소가 되게 하는 관절 속도를 구할 수 있으며, 이 때의 관절 속도는 normalized null space vector $\hat{\psi}$ 와 scale factor z에 의해 결정되어진 값중 하나이다. 관절의란이 최소가 되게 하는 scale factor를 minimum scaler, \hat{z} 라 하면, 관절의란을 최소로 하게 하는 관절속도는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\dot{q} = J^+ \dot{x} + \hat{\psi}\hat{z} \quad (10)$$

직교좌표계의 직선운동에 대해서 주관심은 주어진 직선궤적에 대해 관절의란에 의해 얼마만큼의 추적오차를 발생하며 정확한 위치명령을 수행하는 가이다.

로봇의 직선운동 형태가 시간 t에 따른 cubic polynomial 형태의 궤적을 갖는 직선운동에 대해 조사하기로 한다.

로봇의 이동시간을 t_i 부터 t_f 까지로 하고, 미세 시간을 Δt 라 하자. 식(10)에서 \dot{q} 는 Δt 동안 Δz 의 변화에 의해 ξ 개의 관절속도값 갖는다. 이 때 관절의란 토오르크의 2-norm을 최소로 하는 \dot{q} 를 최적관절속도값을 \dot{q}_d 라하자. 식(10)을 다시쓰면

$$\dot{q}_d = J^+ \dot{x} + \hat{\psi}\hat{z} \quad (11)$$

이고, 이 때 $\delta\tau_d$ 를 Δt 동안의 최소관절의란이라 한다.

시작점의 관절위치를 $Q_i(q_{i1}, q_{i2}, q_{i3})$, 끝점의 관절위치를 $Q_f(q_{f1}, q_{f2}, q_{f3})$ 라 하고, 직교좌표 공간상의 시작위치를 $P_i(Px_i, Py_i, Pz_i)$, 끝위치를 $P_f(Px_f, Py_f, Pz_f)$ 라 하자. 로봇의 이동시간 t는 t_i 부터 t_f 까지로 하고, 미세 시간을 Δt 라 하며, 또한 scale factor z의 최소 값을 z_{min} , 최대 값을 z_{max} , 미세변위를 Δz 라 한다. normalized null space vector는 $\hat{\psi}$, 최적 scale factor는 \hat{z} 이며, $q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d$ 는 각각 Δt 동안 최소관절의란 $\delta\tau_d$ 를 위한 최적관절위치, 속도, 가속도이고, P, \dot{P}, \ddot{P} 는 각각 시간 t에 대한 직선상의 궤적이동경로점의 위치, 속도, 가속도를 나타내고, a_0, a_1, a_2, a_3 는 직선궤적의 형태를 나타내는 cubic polynomial 계

수이며, J는 jacobian matrix를, J⁻¹는 jacobian matrix의 Pseudo-inverse를 나타낸다.

3.2 관절의란 토오르크 최소화 알고리즘

1. Set $t_i, t_f, \Delta t, t = t_i, z_{max}, z_{min}, \Delta z, z = z_{min}$
2. Set $Q_i(q_{i1}, q_{i2}, q_{i3}), Q_f(q_{f1}, q_{f2}, q_{f3})$
3. Find $P_i(Px_i, Py_i, Pz_i), P_f(Px_f, Py_f, Pz_f)$
using forward kinematics
4. compute a_0, a_1, a_2, a_3 .
5. Compute P, \dot{P}, \ddot{P} .
6. Compute J, and J⁻¹.
7. Select null space vector ψ
and get nnormalized null space vector $\hat{\psi}$.
8. while($z = \hat{z}$)
 $z = z + \Delta z$;
return $q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d$ and save $\delta\tau_d$
9. if $t = t_f$ then Robot motion End
else $t = t + \Delta t$ and go to 4

4. Simulation

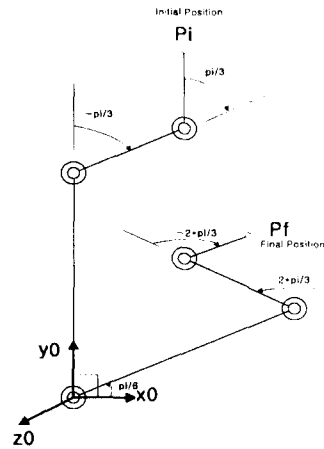


그림 2. Simulation 모델의 시작위치와 끝위치
The initial and final position of the simulation model

그림 2.는 Simulation에 적용할 모델로 여유자유도를 가지는 3관절 평면 로봇 매니플레이터의 시작관절위치와 끝점의 관절위치를 나타낸 것으로 link 길이는 $l_1 = 1m, l_2 = 0.5m, l_3 = 0.3m$ mass는 $m_1 = 10kg, m_2 = 5kg, m_3 = 3kg$ 라고 가정한다. 또한 중력 가속도는 9.8065m/s²로 한다. 로봇의 end-effector의 시작점의 관절위치 q_i 는 각각 $(\pi/2, -\pi/6, -\pi/3)$, 끝점의 관절위치 q_f 는 각각 $(\pi/4, -\pi/2, \pi/4)$ 라 한다. 직교좌표공간상의 시작위치로부터 끝위치까지 궤적경로의 이동은 cubic polynomial에 의한 직선 경로를 사용한다. 직선경로상의 이동시간은 $t_i = 0$ sec로부터 $t_f = 1$ sec 까지 $\Delta t = 0.001$ sec로 하여 궤적을 계획하였다. scale factor z는 $z_{min} = -30, z_{max} = 30, \Delta z = 0.01$ 로 하였다.

Simulation은 Pseudo-inverse방법을 이용한 궤적과 여유자유도를 이용한 관절의란 최소화방법을 이용한 궤적을 서로 비교하여 그 차이를 분석하였다.

4.1 Pseudo-inverse방법을 이용한 궤적

pseudo-inverse를 이용한 방법은 local optimization으로 식(2)에서 $z = 0$ 로 하여 최적관절속도 \dot{q}_d 를 구한 후, 얻어진 관절속도를 관절의란식인 식(7)에 대입하여 관절의란 토오르크를 계산하였다. 그림 3.은 pseudo-inverse 방법을 이용한 궤적에 대한 관절의란을 나타낸 것이다.

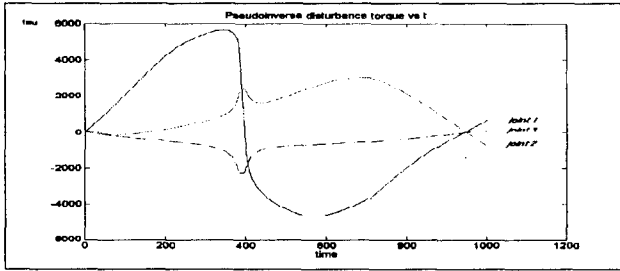


그림 3. Pseudo-inverse방법을 이용한 관절1,2,3에 대한 관절외란 시뮬레이션 결과
The simulation results of the disturbance torque1,2,3 using Pseudo-inverse local optimization method

4.2 최소관절외란법을 이용한 제어

3.2에서 정리한 여유자유도를 이용한 최소관절외란 알고리즘을 이용하여 $t_i=0$ sec로부터 $t_f=1$ sec까지 $\Delta t = 0.001$ sec로 하여 $\xi=1001$ 개의 중간경유점들을 거치도록 제어를 계획하였다. 각각의 중간경유점마다 관절외란이 최소가 되도록 \hat{q} 에 대한 \hat{z} 를 정하고, \hat{q} 와 \hat{z} 에 의해 최적관절속도 \hat{q}_d 의 해를 얻어, 최소관절외란 δr_d 를 구한다. 각각 구해진 δr_d 를 전체 제력에 나타내면, 관절외란이 최소가 되는 제력을 생성할 수 있다. 그림 4.는 여유자유도를 이용한 최소관절외란법을 이용한 제력에 대한 최소관절외란을 나타낸 것이다.

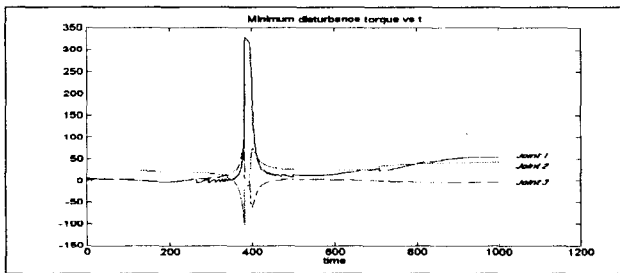


그림 4. 최소관절외란법을 이용한 관절1,2,3에 대한 관절외란 시뮬레이션 결과
The simulation result of the disturbance torque1,2,3 using joint disturbance torque optimization method

4.3 Simulation 결과 분석

작업공간내에서 simulation에서 사용한 주어진 직선이동 경로에 한해서 여유 자유도를 이용한 관절외란 최소화방법이 pseudo-inverse를 이용한 방법보다 500%이상의 좋은 성능을 보였다. 그림 5.에 그 차이를 2-norm으로 비교하여 보였다.

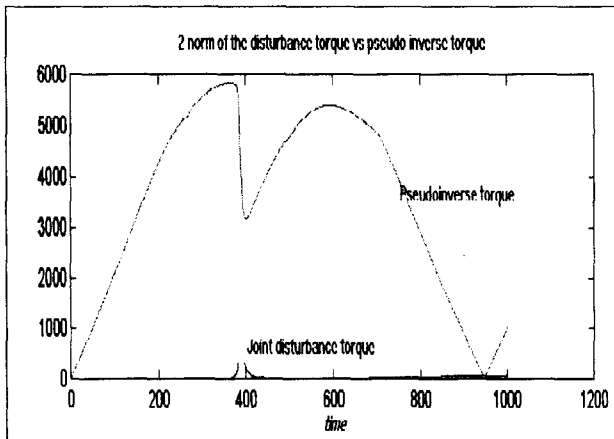


그림 5. 최소관절외란의 2-norm 비교
Compare 2-norm of joint disturbance torque optimization with pseudo-inverse local optimization

5. 결론

Redundancy resolution에 있어서 관절외란이 최소가 되게 하는 최소관절외란법을 제안하였으며, 제안한 최소외란관절법을 이용하여 역기구학의 해와 계획제어를 다룰 수 있음을 보였다.

관절외란을 최소화하는 방법에 있어서 여유자유도를 이용한 최소관절외란법이 pseudo-inverse를 이용한 방법과 비교하여 분배 로봇의 제어성능이 500% 더 개선되었다.

그 결과, 독립관절제어방식을 사용하는 여유자유도를 가지는 로봇에 대해 최소관절외란법을 이용하여 제어하므로써 고정도 (high precision)운동을 가능하게 한다.

참고문헌

- [1] C. H. An, et al, "Model Based Control of a Robot manipulator," The MIT Press, 1988.
- [2] J. Baillieul, "Kinematic programming alternatives for redundant manipulators" *Int. Conf. On Robotics And Automation proc.* March 1985
- [3] J. Baillieul, J.M. Hallerbach and R. Brockett, "programming and Control of Kinematically redundant manipulators" *Proc. 23rd Conf. On Decision and Control.* April 1984
- [4] K.S. Fu, R.C. Gongalez, C.S.G. Lee, "ROBOTICS Control, Sensing, Vision and Intelligence" McGraw-Hill, Singapore, 1987
- [5] H. Hanafusa, T. Yoshikawa, and Y. Nakamura, "Analysis and control of articulated robot arms with redundancy", *Prepr. 8th Triennial IFAC World Congress.* XIV, 1981
- [6] J. S. Hermmeler, F. B. Prinz, "Optimal Path Placement for Kinematically Redundant Manipulators" *IEEE Int. Conf. on Robotics And Automation*, pp. 1234-1244, April 1991
- [7] K. Kazerounian, z. Wang, "Global versus Local Optimization in Redundancy Resolution of Robotic Manipulators", *The Int. Jour. of Robotic Research*, vol. 7, no. 5, October 1988
- [8] C. A. Klein, C. H. Huang, "Review of Pseudoinverse Control for Use with Kinematically Redundant Manipulators", *IEEE. Trans. Syst., Man, Cybern.*, vol. SMC-13, no., pp.245-250, March/April 1983
- [9] A. Liegeois, "Automatic supervisory control of the configuration and behavior of multibody mechaisms" *IEEE Trans. Systems, Man, Cyber.* SMC-7, 1977
- [10] R. Paul, "Manipulator cartesian path control" *IEEE Trans. Systems, Man, Cyber.*, vol. SMC-9, no. 11, Nov. 1979
- [11] K. C. Suh, J. M. Hallerbach, "Local versus Global Torque Optimization of Redundant Manipulators" *IEEE Conf. On Robotics And Automation*, vol. 1, pp. 619-624, March 1987
- [12] D. E. Whitney, "Resolved motion rate control of manipulators and human prostheses" *Trans. Man-Machine Systems*, MMS-10, 1969
- [13] D. E. Whitney, "The mathematics of coordinated control of prosthetic arms and manipulators" *ASME J. Dynamic Systems, Meas., Control*, pp. 303-309, 1972
- [14] 서일홍, 엄광식, 권기호, "외란 관측기를 이용한 직접구동형 로봇의 고속 고정도 제어", *Proc. 11th KACC*, pp.948-951, 1996
- [15] 최명환, "독립관절 로봇의 관절외란해석과 최적경로위치 문제의 해법", *KACC*, Oct. 1997