

근사 자코비안 연산자를 이용한 탄성 지지부를 갖는 로봇 시스템의 제어

이선*, 이호길**, 황성호**, 이세현***

Control of Robot System on the Elastic Base by Approximate Jacobian Operators

Sun Lee*, Ho-Gil Lee**, Sung-Ho Hwang** and Sehun Rhee***

ABSTRACT

This paper presents a study on the position tracking control of a robot system on the uncertain elastic base. The elastic base is a nonholonomic system but it can be changed into holonomic system, which is much easier to analyze, by modeling an elastic base as a virtual robot that has passive joints. Also, Jacobian operators, which represent the overall robot system including base movement, are defined and applied to the changed model. However, because base movements are not known, the exact Jacobian operators can't be estimated. The control algorithm proposed is that uses only Jacobians of a real robot as approximate Jacobian operators. Therefore the approximate Jacobian operators compensate the measured errors from external sensors. The proposed control strategy is evaluated by the simulation and experiment of a single-axis robot system on the elastic base.

Key Words : External Sensor(외계 센서), Jacobian Operator(자코비안 연산자), Approximate Jacobian(근사 자코비안), Elastic Base(탄성지지부), Base Uncertainty(지지부 불확실성), Robot System Control(로봇 시스템 제어)

기호설명

Q : damping constant matrix
Ω : elastic constant matrix
R : inertia matrix
J_θ : Jacobian matrix of real robot
J_q : Jacobian matrix of virtual robot
F : Jacobian operator
F_c : approximate Jacobian operator

F_r : remain Jacobian operator
K_p : proportional gain matrix
G_v : derivative gain matrix
C : damping constant
K : elastic constant
K_p : proportional gain
K_D : derivative gain
M : mass of robot body
m : mass of end-effector

2001년 1월 12일 접수

* 현대종합금속주

** 한국생산기술연구원

*** 한양대학교 기계공학부

1. 서론

로봇은 그 동안 산업용, 즉 제조업 분야에서 널리 사용되어 왔으나 최근 들어 비제조업 분야에서도 점차 그 수요가 증가하고 있다. 제조업분야에서의 로봇은 대체로 매니플레이터 암을 의미하며, 지지부(base)가 바닥이나 벽면 또는 튼튼한 갠트리에 단단히 고정되어 있다. 그러나 휠체어 로봇(wheel chair robot), 홈로봇(home robot)과 같은 비제조업 분야에서 로봇은 이동 플랫폼 위에 매니플레이터 암이 없혀지는 형태를 갖고 있으며, 건설용 수직 철골 용접 로봇과 같은 경우에는 로봇이 레일 위를 주행하며 철골주위를 이동하게 된다. 이때 건설현장이라는 환경에서 활용하기 손쉽게 사용하기 위해 가볍고 운반하기 쉬운 경량의 레일이 사용된다. 이러한 경우 로봇은 그 지지부가 고정되어 있지 않은 형태가 되어 매니플레이터 암의 운동에 의해 지지부가 탄성거동을 일으키며, 이 탄성거동은 로봇의 위치추종성에 악영향으로 작용한다.

본 논문에서는 이처럼 지지부가 고정되어 있지 않은 매니플레이터에서 지지부의 탄성변위가 발생하는 경우에도 목표 위치를 추종할 수 있는 제어방법에 대해 연구를 수행하였다.

미지의 로봇 거동에 관한 연구로는 로봇 지지부의 불확실성에 관한 것보다는 주로 로봇 팔의 탄성변형으로 발생하는 오차에 대한 연구나 링크나 관절의 진동으로 야기되는 변위의 억제, 제어기의 불완전성 보상 등에 관한 연구가 주를 이루었다. 그 방법으로 적응제어^[1,2,3]를 써서 추적성능을 유지하거나, 신경회로망^[4,5,6,7]을 이용하여 기존 제어기의 일부 기능을 대신하거나 보완하는 연구 등이 있다.

지지부에 탄성이 있다면 로봇 본체의 위치가 지지부의 동특성에 의해 결정되기 때문에 구속조건은 적분항을 포함하는 이른바 nonholonomic system 이 되어 문제가 단순하지 않게 된다. 따라서, 본 논문에서는 가상적인 다관절 로봇을 도입함으로써 이 문제를 holonomic 문제로 변환시켰다. 이러한 가상 로봇을 이용하여 지지부를 모델링한 후, 시스템의 특성을 고려하여 자코비안 연산자를 정의하고 정의된 자코비안 연산자를 써서 외계센서로부터 나오는 end-effector 의 위치오차를 각 관절의 변위로 배분하여 제어하는 방법을 제안하였

다. 이때 자코비안 연산자는 로봇자체의 운동과 지지부의 탄성변위에 모두 관여하여 목표위치로의 수렴성이 보장되도록 만들어져야 한다. 이를 위해 본 논문에서는 실제 로봇의 자코비안을 근사 자코비안 연산자로 대체해서 사용하는 제어방법을 제안하였으며, 이러한 제어방법을 1축 로봇에 적용하여 시뮬레이션과 실험을 통해 그 유용성을 검증하였다.

2. 탄성 지지부를 갖는 로봇의 제어

2.1 가상 링크를 이용한 모델링

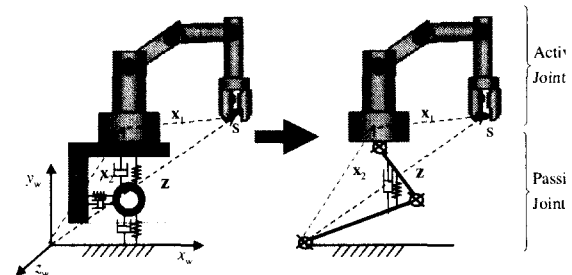


Fig. 1 Modeling of robot on the elastic base

Fig. 1 의 좌측 그림은 p 개의 회전관절로 구성된 실제 로봇과 레일과 주행부로 이루어진 탄성 지지부를 나타낸 것으로, 탄성 지지부는 스프링과 댐퍼 요소로 표시하였다. 이 탄성 지지부를 Fig. 1 의 우측 그림과 같이 외력에 의해서만 변위가 발생하는 수동관절을 갖는 가상의 로봇으로 바꾸었고, 가상 로봇의 자유도는 그 변위가 실제 로봇 운동으로부터 발생하므로 실제 로봇과 같은 p 개의 자유도로 하였다. End-effector 의 한 점, s 의 위치와 자세각을 작업좌표계(world coordinate)에서 본 벡터형식으로 표현하여 z 라 하고, 그 차원도 로봇이 가질 수 있는 자유도와 같은 p 라고 본다. 이때 z 는 base 에서 end-effector 를 본 위치 벡터 x_1 과 외계에서 지지부를 본 벡터(가상로봇 관절의 탄성 변위) x_2 의 합으로, 동차변환(homogeneous transformation)을 통해 다음과 같이 표현된다.

$$z = x_1 + x_2, \quad z, x_1, x_2 \in \mathbf{R}^{p \times 1} \quad (1)$$

$$z = h(\theta, q) \quad (2)$$

$$\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p]^T, \quad q = [q_1, q_2, \dots, q_p]^T,$$

여기서 θ 는 실제 로봇의 관절 변위이고, q 는 가상로봇 관절의 탄성변위다.

이러한 가상 로봇을 도입한 모델링을 통해서 지지부의 탄성변위와 실제 로봇의 변위는 $2p$ 개의 관절을 갖는 하나의 로봇으로 간주된다. 사실 가상 로봇의 변위는 지지부의 탄성 거동을 의미하므로 실제 로봇의 가속도에 영향을 받는 nonholonomic 문제이지만, 이러한 모델링을 통해서 $2p$ 개의 관절을 갖는 holonomic 문제로 전환할 수 있다. 따라서 이후 전개될 동력학적 구조 특성 파악에 있어서 지금까지 사용하던 로봇 역학을 그대로 사용할 수 있는 장점이 있다.

2.2 탄성 지지부를 갖는 로봇의 동력학 모델과 구조특성

Fig. 1 에서 모델링된 시스템의 운동에너지는 $\dot{\theta}, \dot{q}$ 의 함수이고, 중력을 고려하지 않고 가상로봇 관절의 탄성변위에 대한 탄성에너지만을 고려하여 Hamilton 의 변분원리를 적용하고, 비선형항(코리올리력, 원심력)을 제거하면 다음과 같은 형태의 선형 운동방정식이 얻어진다. 여기서 C_i 는 가상로봇 각 관절의 damping 계수이고 K_i 는 스프링 상수, u 는 p 개의 입력항으로 모터로부터 나오는 토크가 된다.

$$\begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{12}^T & R_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \Omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (3)$$

$$Q > 0, Q \in \mathbf{R}^{p \times p}, Q = \text{diag}\{C_1, C_2, L, C_p\}$$

$$\Omega > 0, \Omega \in \mathbf{R}^{p \times p}, \Omega = \text{diag}\{K_1, K_2, L, K_p\}$$

$$u = [\tau_1, \tau_2, L, \tau_p]^T$$

식(3)의 좌변 제 1 항은 관성항으로 다음과 같은 특징이 있다.

$$R(\theta, q) = R(\theta, q)^T, R(\theta, q) > 0, R(\theta, q) \in \mathbf{R}^{2p \times 2p} \quad (4)$$

이 관성항에 의해서 실제 로봇과 가상로봇은 상호 간섭되고 있으며, 실제 로봇의 운동은 관성항의 간섭을 통해 가상로봇의 운동, 즉 지지부의 탄성 변위로 나타난다. 따라서 가속운동이 없다면 가상로봇의 운동도 발생하지 않는다.

2.3 자코비안 연산자

End-effector 의 작업좌표상의 위치벡터는 식 (2) 와 같다.

이것은 외부센서에 의해 측정되는 위치이다. End-effector 의 목표벡터가 z_d 이고 $q = [0]^T$ 라고 할 때 이에 대응되는 관절목표 θ_d 가 존재하는 영역은 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$z_d \in \varepsilon, \varepsilon = \{z \mid \det(\partial h / \partial \theta) \neq 0\} \quad (5)$$

일반적으로 end-effector 의 위치에 대해 위 조건을 만족하고 적당한 영역을 선정하면 유일한 해를 결정할 수 있다. 이것은 가상로봇이 움직이지 않고 고정되어 있다고 가정하면 실제로봇과 같은 조건이다.

목표 z_d 부근에서 각 관절의 미소 변위 $\delta\theta, \delta q$ 에 대하여 end-effector 의 미소변위 δz 는 자코비안 행렬을 곱해서 구할 수 있고 $\delta z \equiv z, \delta\theta \equiv \theta, \delta q \equiv q$ 라 정의하면 다음과 같다.

$$z = J_\theta \theta + J_q q \quad (6)$$

$$J_\theta = \left[\frac{\partial h}{\partial \theta} \right], J_q = \left[\frac{\partial h}{\partial q} \right], J_\theta \in \mathbf{R}^{p \times p}, J_q \in \mathbf{R}^{p \times p},$$

$$\theta = \theta_d, q = 0$$

여기에서 J_θ, J_q 는 자코비안 행렬로 각각 관절운동과 지지부의 탄성거동(가상로봇의 관절운동)에 관련된다. 앞 절의 모델의 운동방정식(3)의 제 2 열로부터 지지부 변위는 실제 로봇의 운동에 수반되는 부차적인 동적 운동이기 때문에, q 는 θ 에 대한 미분 또는 적분을 포함하는 연산자로 다시 표현할 수 있는 것을 알 수 있다. 여기서 적당한 근사 자코비안을 개발하기 위해서 다음의 식 (7)로 정의되는 자코비안 연산자(Jacobian operator) F 를 도입한다.

$$z(t) \equiv F[\theta(t)] \quad (7)$$

자코비안 연산자, F 의 특징을 알아보기 위해, 식(3)의 두번째 행과 식(6)을 Laplace 변환하여 다음 식을 얻을 수 있다.

$$z(s) = F(s)\theta(s) \quad (8)$$

$$\mathbf{F}(s) = \mathbf{J}_\theta \cdot s^2 \mathbf{J}_q \left[s^2 \mathbf{R}_{22} + s\mathbf{Q} + \mathbf{\Omega} \right]^{-1} \mathbf{R}_{12}^T \quad (9)$$

식(9)을 살펴보면 행렬 $\mathbf{F}(s)$ 는 proper 하며 안정된 극을 갖는 전달함수로 구성되는 행렬임을 알 수 있다. 또한 언급한 바와 같이 \mathbf{q} 가 θ 에 대한 미분 또는 적분을 포함하는 연산자로 다시 표현된 것을 알 수 있다.

2.4 근사 자코비안 연산자와 외계센서 귀환 제어법^[8]

실제로 \mathbf{J}_q 는 가상로봇의 기하학적 관계이므로 자코비안 행렬의 계산은 물론 \mathbf{q} 의 변화를 추정하는 것도 불가능하다. 제어시 이용할 수 있는 유일한 방법으론 자코비안 행렬을 근사한 이른바 근사 자코비안 행렬뿐이다.

전달함수행렬 $\mathbf{F}(s)$ 는 부분분수행렬로 나눌 수 있다. 이 부분분수 전달함수행렬에 대응하는 부분 연산자를 정의함으로써, 자코비안 연산자 \mathbf{F} 또한 부분연산자의 합으로 표현할 수 있다.

만약 우리가 제어하고자 하는 모드에 관련되는 설계 자코비안 연산자를 \mathbf{F}_C 로, 나머지 모드에 관련되는 잔여연산자를 \mathbf{F}_R 이라 한다면 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\mathbf{z} = \mathbf{z}_C + \mathbf{z}_R, \quad \mathbf{z}_C = \mathbf{F}_C \theta, \quad \mathbf{z}_R = \mathbf{F}_R \theta \quad (10)$$

이때, \mathbf{F} 는 유한연산자이므로, 부분연산자 \mathbf{F}_C , \mathbf{F}_R 또한 유한연산자이다. \mathbf{F}_C 는 실제 매니플레이터의 외계센서귀환에서의 자코비안 행렬과 같이 제어기에서 직접 연산하는데 쓰일 근사 자코비안 연산자이고, \mathbf{F}_R 은 제어기 속의 연산과정에서 무시되는 잔여연산자이다.

만일 $\mathbf{F}(s)$ 의 지배적인 유한개 부분전달함수로 구성되는 $\mathbf{F}_C(s)$ 를 선택한다면, 대응되는 근사 자코비안 연산자 \mathbf{F}_C 는 쉽게 구할 수 있어, 실제 로봇의 외부센서귀환과 같이 on line 제어입력을 생성시킬 수 있다. 근사 자코비안 연산자는 자코비안 행렬과 달리 $p \times p$ 의 정방행렬이어서 종래의 제어이론과 연결이 용이하다.

외계센서 귀환제어기를 실제 매니플레이터의 PD 제어기와 유사하게 아래와 같이 설계하도록 한다.

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}_p \mathbf{F}_C^* \mathbf{z} - \mathbf{G}_v \dot{\theta} \quad (11)$$

여기서 \mathbf{F}_C^* 는 공역 근사 자코비안 연산자, $\mathbf{K}_p, \mathbf{G}_v$ 는 positive definite 인 귀환 이득 행렬이다. 제 1항은 시각센서와 같은 외계센서 위치 귀환, 제 2항은 시스템 안정화를 위한 내부센서귀환 즉 관측속도를 이용한 감쇄항이다. 이러한 근사 자코비안을 이용한 외계센서 귀환제어법을 다음 장에서 1축 로봇에 관해서 안정성검토와 시뮬레이션, 그리고 실험을 통해 유용성을 확인한다.

3. 탄성 지지부를 갖는 1 자유도 로봇의 제어

3.1 모델링과 외계센서 귀환 제어법

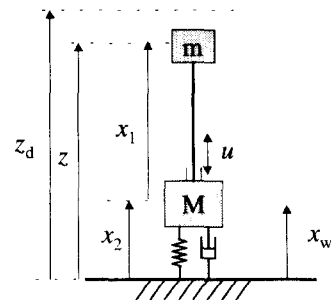


Fig. 2 Modeling of single axis robot on the elastic base

Fig. 2와 같이 작업 좌표계로부터 end-effector 위치를 z , end-effector 목표위치를 z_d , actuator의 변위를 x_1 , 지지부의 탄성변위 즉 가상로봇의 변위를 x_2 라고 하고 식(3)과 유사한 행렬형태로 운동방정식을 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} m & m \\ m & m+M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (12)$$

이 모델로부터도 역시 지지부와 로봇이 관성항에 의한 간섭이 일어남을 알 수 있다. 또한 실제 로봇과 가상 로봇의 Jacobian을 살펴보면 식(6)으로부터 다음과 같이 된다.

$$\delta z = J_1 \delta x_1 + J_2 \delta x_2 \quad (13)$$

제어의 관심은 가상로봇의 변위(지지부의 탄성 변위) x_2 가 있더라도 z 를 목표 z_d 에 일치시키도록 제어하는 것이다. 이를 위해서 감쇄항은 외계센서에서 측정된 속도를 이용하도록 하여서 완전

귀환 제어를 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$u = -K_p F_c^* (z - z_d) - K_D F_c^* \dot{z} \quad (14)$$

여기서 공역 근사 자코비안 F_c^* 를 대신하여 actuator 의 자코비안 J_1 의 전치행렬을 이용한 제어식을 다음과 같이 구성한다.

$$u = -K_p J_1^T (z - z_d) - K_D J_1^T \dot{z} \quad (15)$$

3.2 안정성 증명

식 (12)의 양변에 관성행렬의 역행렬을 곱하여 1 행과 2 행을 더하면, 작업좌표계에서 본 end-effector 의 자유운동방식인 식 (16)과 같아진다.

$$\ddot{z} = \frac{u}{m} \quad (16)$$

식 (15)를 식 (16)에 대입하면 폐회로 시스템의 운동방정식이 된다.

$$m\ddot{z} + K_D J_1^T \dot{z} + K_p J_1^T (z - z_d) = 0 \quad (17)$$

여기서, Lyapunov 함수를 적용하면 다음과 같다.

$$V = \frac{1}{2}m\dot{z}^2 + \frac{1}{2}K_p J_1^T (z - z_d)^2 \quad (18)$$

$m > 0, K_p J_1^T > 0$ 이므로 당연히 $V > 0$ 이다. 또한

$$\dot{V} = m\dot{z}\ddot{z} + K_p (z - z_d)\dot{z} = \dot{z}\{m\ddot{z} + K_p(z - z_d)\} \quad (19)$$

이고, 식(17)을 대입하면

$$\dot{V} = \dot{z}(-K_D J_1^T \dot{z}) = -K_D J_1^T \dot{z}^2 \quad (20)$$

이 되므로 $K_D J_1^T > 0$ 이면 항상, $\dot{V} < 0$ 이다. 따라서 $K_D > 0, K_p > 0$ 이면 점근 안정이다. 그러므로 z 는 z_d 에 수렴한다.

3.3 시뮬레이션

시스템의 상수값이 각각 $M = 10\text{kg}, m = 5\text{kg}, K = 100\text{N/m}, C = 0.1\text{N}, z_d = 0.05\text{m}$ 이고, 제어기의 게

인값을 $K_p = 300, K_D = 150$ 으로 하였을 때 시뮬레이션을 수행하였다. 로봇의 actuator 부분의 변위 (x_1)와 이에 따른 가상로봇의 변위(x_2), 그리고 end-effector 의 변위(z)를 Fig. 3 에 보여준다. 결과로부터 목표위치에 도달하기 위해서 actuator 가 작동할 때 지지부의 수동관절은 actuator 의 운동으로 발생하는 반발력에 의한 변위를 일으키고, 제어기는 이를 보완하면서 목표에 수렴시키는 것을 알 수 있다.

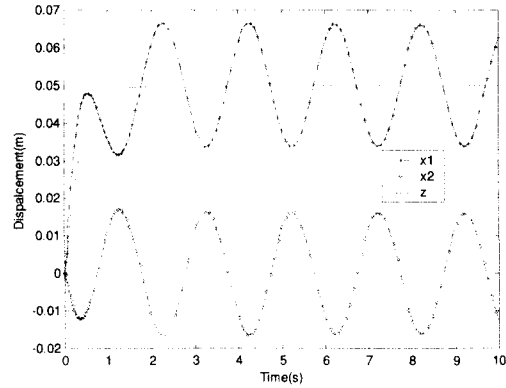


Fig. 3 Displacements of actuator, base and end-effector

지지부에 임의의 외란, 즉 $0.002\sin(\pi t)$ (0.5Hz) 정도의 외란을 주고, 이때 제어 게인값을 $K_p = 700, K_D = 250$ 으로 설정하였을 때 시뮬레이션한 결과를 Fig. 4 에 나타내었다.

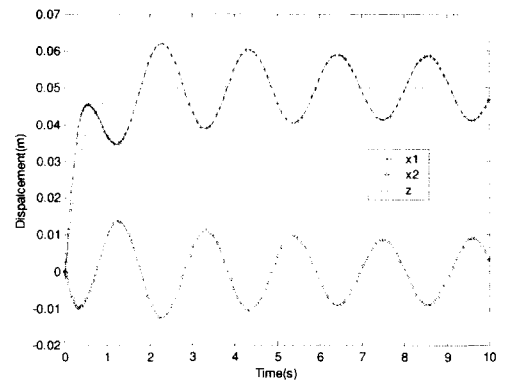


Fig. 4 Displacements of actuator, base and end-effector with disturbance (0.5Hz)

Fig. 5 는 2Hz 의 외란에 대한 시뮬레이션 결과

를 나타낸다. 각각의 결과도 마찬가지로 로봇의 actuator 부분의 변위(x_1)와 이에 따른 가상로봇의 변위(x_2), 그리고 end-effector 의 변위(z)를 각각 나타낸 것으로서, 외란에 대해서도 지지부의 변위를 보완하면서 actuator 를 작동시켜서 목표위치로 end-effector 를 이동시키는 것을 알 수 있다.

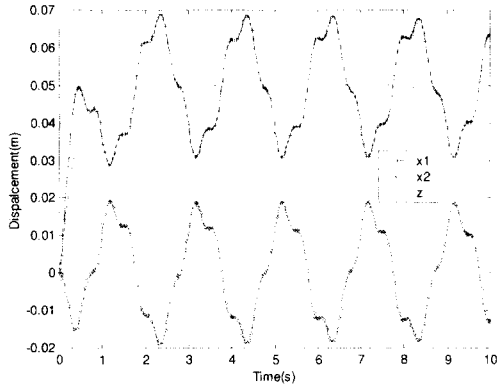


Fig. 5 Displacements of actuator, base and end-effector with disturbance (2Hz)

3.4 시스템 구성 및 실험

실험장치에 대한 기본적인 구성은 Fig. 6 과 같다. 그림에서 보듯이 2 개의 1 축 로봇을 제어부 로봇과 지지부 로봇으로 사용하였으며, 실험에 사용된 하드웨어의 사양을 Table 1 에 정리하였다.

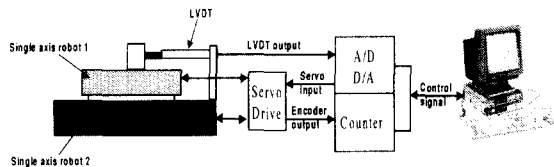


Fig. 6 Concept diagram of experiment

Table 1 Specifications of experimental system

장치	특징	기타
Robot 1	100W AC Servo Motor	2048 pulse/Rev. Encoder 제어부 로봇
Robot 2	200W AC Servo Motor	2048 pulse/Rev. Encoder 지지부 로봇
A/D D/A Board	16 AD Channel 4 DA Channel 4 DIO Channel	Max. Sampling Rate : 333kHz(input), 500kHz(output)
Counter	4 Count Channel	Max. Sampling Rate :

Board		500kHz
PC	Pentium MMX166	Sampling Rate : 주파수 응답 (7480Hz) 2 축 PD 제어(2095Hz)
LVDT	Range : ± 100 mm Out signal : ± 5 V	Resolution : 0.05 mm

지지부 로봇을 강제로 진동 시키면서 제어부 로봇의 위치 제어에 대한 실험을 수행하였다. 이때의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} m & m \\ m & m+M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (21)$$

여기서 τ_2 는 국소 feedback 에 의한 강제력으로 x_2 의 운동을 일으키므로 다음과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 K_{p2} , K_{D2} 는 지지부 로봇의 PD 제어 게인이다.

$$\tau_2 = -K_{p2}(x_2 - x_{2d}) - K_{D2}\dot{x}_2 \quad (22)$$

식(22)를 식(21)에 대입하고, $u = \tau_1$, x_{2d} 근처에서 $x_2 \approx x_2 - x_{2d}$ 라 정의하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} m & m \\ m & m+M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & K_{D2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & K_{p2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u$$

윗 식을 식(12)과 비교하면 C 와 K 가 K_{D2} 와 K_{p2} 로 대체된 같은 수식임을 알 수 있다. 따라서 지지부 로봇을 이용하여 강제진동을 시킨 실험을 하면 탄성 지지부를 갖는 모델에 대한 실험으로 간주할 수 있다.

준비 실험 단계로 2 개의 로봇의 주파수 응답 실험을 수행하였다. Feedback 없이 정현파의 속도 신호를 각 주파수 별로 주고, 서보 드라이브를 통해 로봇에 그 입력이 전달될 때 엔코더 신호를 받아서 출력 속도를 계산하였다. 제어를 수행하는 프로그램은 한번의 loop 에 모터신호 출력과 엔코더 신호 입력을 수행하여 동기화시켰다. Fig. 7 에는 제어부를 쓰이는 로봇 1 에 대하여 게인과 위상 지연을 주파수별로 나타내었다. 로봇 1 은 3Hz 에서 9Hz 에 걸쳐서 게인이 1 이상이 나오는 공진영역이 나타난다. 지지부로 쓰인 로봇 2 도 비슷한

경향을 보이고 있다.

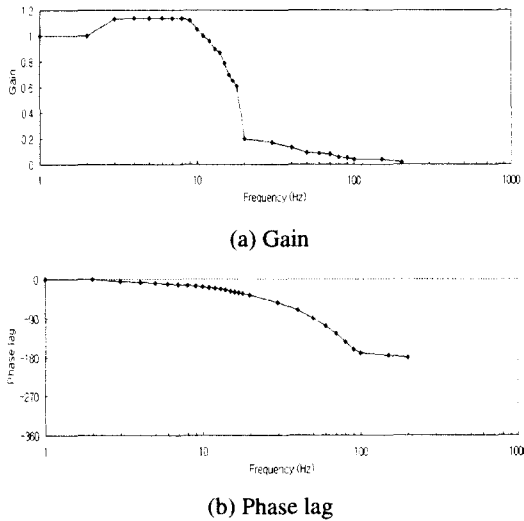


Fig. 7 Frequency response of robot 1

외란 주파수가 0.5Hz, 2Hz 일 때 실제로 LVDT 를 외계센서로 사용하여 귀환제어를 한 실험 결과를 Fig. 8, Fig. 9 에 나타내었다. 외란은 주파수별로 정현파를 지지부 로봇(로봇 2)에서 발생시키고, 이를 보상하면서 제어부 로봇(로봇 1)이 end-effector 를 $z_d = 0$ 에 위치하도록 제어하였다. 주파수가 높아 짐에 따라 약간씩 흔들림이 발생하였는데 이는 LVDT 센서가 모터의 작동에 따라 심한 노이즈를 발생하기 때문에 충분한 제인을 주지 못한데 기인 한다. 심한 노이즈는 결국 로봇에 진동을 유발하게 되어 계인이 너무 클 경우 폭주하는 경향을 보였다.

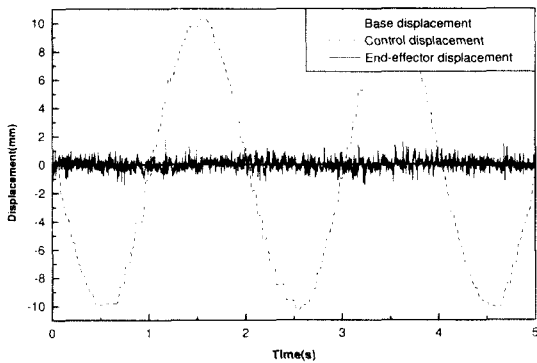


Fig. 8 Experimental results using LVDT, 0.5Hz disturbance

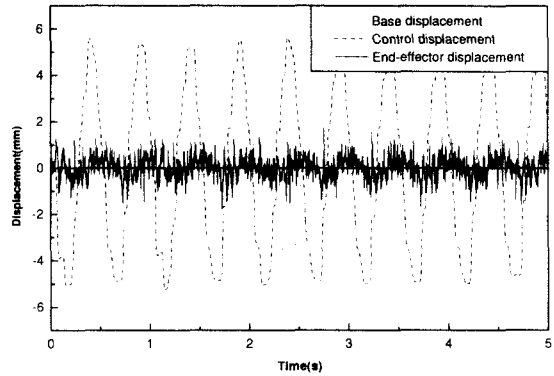


Fig. 9 Experimental results using LVDT, 2Hz disturbance

Fig. 10 은 노이즈 영향이 없는 경우를 가정하여 두 로봇의 encoder 의 합을 외계센서로 간주하고 외란 주파수가 2Hz 일 때의 실험 결과를 보여 준다. 예상대로 LVDT 센서를 쓸 때보다 좋은 결과를 보이고 있으며, 따라서 본 논문에서 제시한 제어 방법을 사용하여 지지부 거동이 있는 경우에도 위치 추종 제어가 가능함을 알 수 있다.

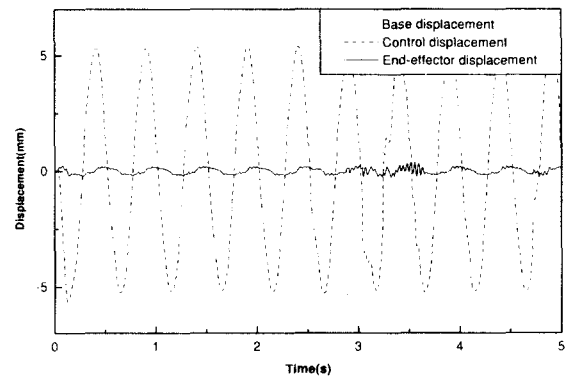


Fig. 10 Experimental results using encoder1 + encoder2 , 2Hz disturbance

4. 결론

지지부가 고정되지 않는 형태의 로봇에는 그 로봇의 움직임에 따라 지지부에 탄성 변위가 발생한다. 이 논문은 이러한 지지부의 탄성변위가 불확실하더라도 외계센서를 사용하여 작업 좌표계에서부터 end-effector 의 위치를 측정하면 actuator 만의 자코비안을 근사 자코비안 연산자로 대신 사용

하여 제안된 제어방법으로 제어가 가능하다는 것을 보였다. 이러한 제어방법의 강점은 불확실한 지지부에 대한 어떠한 복잡한 해석을 하지 않고도 제어할 수 있다는데 있다.

이러한 외계센서 귀환 제어를 수행하기 위해서 가상로봇을 이용한 모델링으로 nonholonomic 구속문제를 holonomic 구속문제로 전환하였고, 자코비안 연산자를 도입하여 제어방법을 도출하였다. 그리고 실제로봇의 자코비안을 근사 자코비안 연산자로 대신하여 사용하는 제어방법을 제안하였다. 이러한 자코비안 연산자의 개념은 우리가 원하는 목적에 맞게 연산자를 선정하여 효율적인 제어의 추구가 가능하도록 해준다.

Simulation 과 실험을 통해서 알 수 있듯이 1 자유도의 로봇과 탄성변위를 갖는 경우, 로봇은 지지부의 변형을 보완하면서 외계에서 보았을 때 end-effector 는 목표위치에 수렴하고 있음을 알 수 있다.

다자유도를 갖는 경우에도 최종의 end-effector 의 위치를 Laser vision sensor 등의 외계센서로 측정 한 뒤 다축 로봇만의 자코비안을 근사 자코비안 연산자로 사용하여 제안된 제어루프를 구성하면 위치 추종이 가능하다고 본다. 향후 다축 로봇에 적용하여 그 유용성을 살펴보는 것이 필요하며, 자코비안 연산자를 선택하는 좀더 효과적인 방법에 대한 연구가 요구된다.

참고문헌

1. J. J. E. Slotine and W. Li, "Adaptive manipulator control," IEEE Trans. Automatic Control, Vol. 33, No. 11, pp. 995-1003, 1988.
2. J. J. Craig, Adaptive control of mechanical manipulators, Addison-Wesley, 1988.
3. M. W. Spong, "On the Robust control of Robot Manipulators," IEEE Trans. Automatic Control, Vol. 37, No. 11, pp. 1782-1786, 1992.
4. G. Feng, "Improving Tracking Control for Robots using Neural Network Compensator for Uncertainties of Robotic Manipulators," IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 39, No. 6, pp. 565-570, 1992.
5. C. Kwan, F. L. Lewis, Dawson, "Robust Neural-Network Control of Rigid-Link Electrically Driven Robots," IEEE Trans. Neural Network, Vol. 9, No. 4,

pp. 581-588, 1998.

6. 이상재, 이석원, 남부희, "역적과 신경회로망에 의한 로봇 팔의 불확실성 보상," 제어 자동화 시스템공학 논문지, 제 2 권, 제 4 호, 1996. 12.
7. 김성우, 이주장, "불확실성이 있는 로봇 시스템의 역모델 학습에 의한 신경회로망 제어," 제어 자동화 시스템공학 논문지, 제 1 권, 제 2 호, 1995. 12.
8. 이호길, 김진영, "근사 자코비안 연산자를 이용한 경량 매니퓰레이터의 시차 서보 제어," 제어 자동화 시스템 공학 논문지, 2000.