외란 관측기에 의한 기구학적 여유자유도 매니퓰레이터의 강인한 임피던스 제어

Robust Impedance Control of Kinematically Redundant Manipulator Based on Disturbance Observer

오 용 환, 오 상 록, 정 완 균
(Yonghwan Oh, Sang-Rok Oh and Wan-Kyun Chung)

Abstract : Design method of a robust impedance control is proposed for the kinematically redundant manipulators. To achieve this objective, we first use the momentum feedback disturbance observer(MFDOB) scheme which can handle the nonlinear dynamics of a manipulator in joint space. An extended task space formulation to describe the behaviors of task and null spaces of redundant manipulator is employed. Using the extended task space formulation and disturbance observer scheme, a robust impedance control method is designed. The performance of the proposed extended impedance controller is verified through experiments with a planar three links direct-drive manipulator.

Keywords : disturbance observer, redundant manipulator, impedance control

I. 서론

로봇 매니퓰레이터의 실제 적용에 있어서는 모델링 오차나 알 수 없는 외란 등의 많은 불확실성들이 존재한다. 이러한 외란은 전체 시스템의 성능을 저하시키기 때문에 제어기는 미지의 외란이나 모델링 오차를 극복하고 원하는 성능을 나타낼 수 있어야 한다. 이를 위해 지금까지 여러 가지 방법들이 제안되어 왔고 최근에 그 중 하나인 외란 관측기(disturbance observer)를 이용하여 시스템을 좀더 빠르고 정확하게 제어하기 위한 많은 노력이 있어 왔다[1,2,3,4]. Y. Oh 등은 기존의 외란 관측기의 특성을 유지하면서 로봇의 비선형적인 동역학을 포함시킬 수 있는 운동량 궤환 외란관측기를 제안하였고 그 위치제어의 성능을 실험적으로 보였다[5].

한편 이러한 시스템의 강인성 문제 이외에 기구학적 여유자유도 매니퓰레이터는 비 여유자유도 매니퓰레이터에 비해 많은 장점을 갖고 있기 때문에 꾸준한 연구가 진행되고 있다[6]. 여유자유도 매니퓰레이터의 제어를 생각할 때, 작업공간의 운동 이외에 작업공간의 표현으로는 보이지 않는 영공간(null space)의 동역학이 존재하게 되므로 여유자유도 매니퓰레이터를 적절히 제어하기 위해서는 작업공간과 영공간의 운동을 동시에 제어해야 한다[7]. 이를 위한 한 방법으로 관절공간의 가중치 분해(weighted decomposition)에 의해 작업공간과 영공간을 최소 매개변수화하여 표현하는 확장 작업공간(extended task space)에서의 동역학이 제안되었다[8].

본 논문에서는 기구학적 여유자유도를 갖는 매니퓰레이터를 위한 강인한 임피던스 제어기의 설계와 이의 실험적 검증에 대한 내용을 다룬다. 임피던스 제어는 자유운동(free motion)과 접촉운동을 수행하기 위해 전환 메커니즘이나 제어할 부분공간(subspace)에 대한 선택이 필요하지 않는 통합된 방법으로 잘 알려져 있다[9,10]. 이런 임피던스 제어를 여유자유도 매니퓰레이터에 적용하기 위해 많은 방법들이 제안되어 왔다[10,11,12]. 기존의 대부분의 방법들은 임피던스 제어에 영공간 댐핑(null space damping)이나 국부적 토크 최적화(local torque optimization)방법들을 결합함으로써 이루어졌으나 이러한 연구 결과들은 영공간에서의 동역학을 고려하지 않았거나 영공간의 특징을 잘 표현하지는 못했다[1,2,3]. 본 논문에서는 먼저 외란을 처리하고 제어시스템에 강인성을 부여하기 위해 참고문헌 [5]에서 위치제어용으로 쓰인 운동량 궤환 외란 관측기를 외부와의 접촉이 있을 경우로 확장하여 사용한다. 따라서 본 논문에서는 외부와의 접촉 시에 알맞게 설계된 운동량 궤환 외란 관측기와 확장 공간에서의 동역학적 표현[8]에 기초하여 여유자유도 로봇을 위한 임피던스 제어기를 설계한다. 이러한 결과를 평면 3 자유도의 직접구동 로봇에 적용하여 실험적으로 그 성능의 우수성을 입증한다.

논문접수 : 2002. 1. 25., 채택확정 : 2002. 8. 2.
오용환 : 한국과학기술연구원(oyh@amadeus.kist.re.kr)
오상록 : 한국과학기술연구원(sroh@amadeus.kist.re.kr)
정완균 : 포항공과 대학교(wkchung@postech.edu)

II. 로봇 매니퓰레이터의 모델링

말단장치의 작업공간을 m 차원이라 하고 관절공간을 n 차원이라 하면, 일반적인 직렬형 로봇 매니퓰레이터의 기구학적 관계는 다음과 같다.

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{J}(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}}, \quad \boldsymbol{J}(\boldsymbol{q}) = \frac{\partial \boldsymbol{k}(\boldsymbol{q})}{\partial \boldsymbol{q}} \tag{1}$$

$$\ddot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{J}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{h}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}), \; \boldsymbol{h}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}) = \dot{\boldsymbol{J}}\dot{\boldsymbol{q}} \tag{2}$$

여기서 $\boldsymbol{k}(\cdot) : \mathcal{R}^n \rightarrow \mathcal{R}^m$은 정 기구학(forward kinematics)을 나타내고 $\boldsymbol{J} \in \mathcal{R}^{m \times n}$은 매니퓰레이터 자코비안

행렬(Jacobian matrix)을 표현한다. 일반적으로 $n > m$이면 이를 기구학적 여유자유도 매니퓰레이터라 하고 $r = n - m$을 여유자유도라 부른다.

관절공간에서의 로봇 매니퓰레이터의 동역학은 다음과 같이 기술된다:

$$\tau = H(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) + J^T(q)f + \rho \quad (3)$$

여기서 $\tau \in \mathcal{R}^n$은 관절 토크 벡터; $H(q) \in \mathcal{R}^{n \times n}$은 관성행렬; $C(q, \dot{q})\dot{q} \in \mathcal{R}^n$은 Coriolis힘과 원심력을 나타내는 벡터; $g(q) \in \mathcal{R}^n$은 중력가속도; $\rho \in \mathcal{R}^n$은 마찰력과 같은 미지의 외란 등을 표현하고 $f \in \mathcal{R}^m$은 외부환경과의 접촉력을 나타낸다. 본 논문에서 $\dot{H} - 2C$는 반대칭(skew-symmetric) 행렬이라 가정한다.

III. 운동량 궤환 외란 관측기(MFDOB)

기존에 외란 관측기의 설계는 (3)에서 각 관절을 간단한 관성만을 갖는 선형 시스템으로 모델링하고 이를 제외한 모든 항들을 외란으로 간주하여 구성된다[4]. 그러나 많은 관성행렬의 변동에 대해 너무 단순화시킨 모델과 비간섭화는 전체 시스템의 성능에 영향을 줄 수 있으므로 동역학적 모델이 실제 시스템에 가까울수록 보다 나은 성능향상을 기대할 수 있다. 이를 위해 본 논문에서는 그림 1과 같은 운동량 궤환 외란 관측기(Momentum Feedback Disturbance Observer)를 이용한다[5]. 그림에서 p_o은 모델 시스템의 일반적인 운동량을 나타내고 다음과 같이 표현된다.

$$p_o = H_o(q)\dot{q} . \quad (4)$$

(4)를 미분한 식과 $\dot{H}_o = C_o + C_o^T$의 관계를 이용하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\tau^* = \dot{p}_o + \tau_{dist} \quad (5)$$

여기서 $\tau^* = \tau + C_o^T(q, \dot{q}) - J^T(q)f$이고 τ_{dist}는 모든 외란을 표현한다. 위의 식에서 모든 외란은 τ^*와 운동량의 미분을 알면 관측될 수 있으나 운동량의 미분은 가속도를 포함하기 때문에 실제 외란이 아닌 다음과 같은 추정 외란(estimated disturbance)을 사용한다.

$$\hat{\tau}_{dist} = Q(s)[\tau^* - s\, p_o] \quad (6)$$

여기서 $Q(s)$는 DC 이득(gain)이 1인 저역 통과 필터(low-pass filter)이고 전체의 관절 지령토크는 다음과 같은 형식으로 표현될 수 있다.

$$\tau = \tau_c + \hat{\tau}_{dist} \quad (7)$$

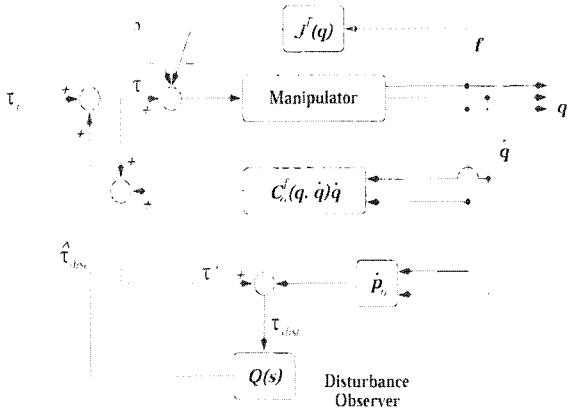


그림 1. 운동량 궤환 외란 관측기.

Fig. 1. Momentum feedback disturbance observer.

여기서 $\hat{\tau}_{dist}$는 (6)과 그림 1에서 보듯이 외란 관측기에서 추정된 값이다.

위 (7)과 (5),(6)을 이용하면 다음과 같은 폐루우프(closed-loop) 관계식을 얻을 수 있다.

$$\tau_c = H_o(q)\ddot{q} + C_o(q, \dot{q})\dot{q} + J^T(q)f + [I_n - Q(s)]\,\tau_{dist} . \quad (8)$$

그러므로 어느 주파수 영역 내에서 $Q(s) \approx I_n$으로 선택하면 우리가 원하는 동역학적 관계를 얻을 수 있다. 위의 운동량 궤환 외란 관측기를 이용한 여유자유도 로봇에 대한 위치제어의 성능은 참고문헌 [5]에서 찾을 수 있다.

위의 운동량 궤환 외란 관측기에서 관성행렬을 대각상수의 선형 모델로 보고 다른 모든 항들을 외란으로 간주하면 기존의 외란 관측기로 축소될 수 있으므로 운동량 궤환 외란 관측기는 비선형의 로봇 동역학을 다룰 수 있도록 기존의 외란 관측기를 좀 더 일반화시킨 방법으로 생각할 수 있다.

IV. 확장 작업공간(extended task space)에서의 여유자유도 매니퓰레이터의 기구학과 동역학

이 장에서는 여유자유도 매니퓰레이터를 위한 확장공간에서의 기구학과 동역학에 대해서 간단히 설명한다[5,8].

잘 알려진 바와 같이 (1)에 대한 일반적인 해는 다음과 같이 주어진다.

$$\dot{q} = \dot{q}_p + \dot{q}_h = J_W^+ \dot{x} + (I_n - J_W^+ J)\xi \quad (9)$$

위의 식에서 $J_W^+ \in \mathcal{R}^{n \times m}$는 J의 가중 의사 역행렬(weighted pseudo-inverse)이고 $\xi \in \mathcal{R}^n$은 임의의 벡터이다. 본 논문에서는 **W = H(q)** 가정한다. 위의 (9)에서 $\dot{q}_p$는 m 차원 말단장치의 속도 벡터($\dot{x}$)에 의해서 특성이 나타나므로 $\dot{q}_h$를 표현하기 위해서는 오직 r 개의 벡터만이 필요하

다. 이를 위해 J의 영공간을 스팬(span)하는 $V \in R^{n \times r}$를 생각하면 $\dot{q}_h$는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\dot{q}_h = (I_n - J_H^+ J)\xi = V(q)\,\dot{x}_N \quad (10)$$

여기서 $\dot{x}_N \in R^r$을 영공간 속도(null space velocity)라고 부르고 (9)와 (10)을 이용하면

$$\dot{x}_N = (V^T H V)^{-1} V^T H\,\dot{q} \triangleq J_N(q)\,\dot{q} \quad (11)$$

이 된다. 여기서 $J_N \in R^{r \times n}$을 영공간 자코비안(null space Jacobian)이라 정의한다.

이제 말단장치의 속도 벡터와 영공간의 속도 벡터를 합하여 확장 작업공간에서의 기구학을 다음과 같이 생각할 수 있다.

$$\dot{x}_E = J_E(q)\,\dot{q} \quad (12)$$

여기에서

$$\dot{x}_E = \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{x}_N \end{pmatrix}, \quad J_E(q) = \begin{bmatrix} J \\ J_N \end{bmatrix}$$

이다.

영공간의 운동을 일으키는 가상의 힘을 $f_N \in R^r$이라 하고 이를 말단장치에서의 힘(f_c)과 결합한 것을 다음과 같이 표현한다.

$$f_{Ec}^T = (f_c^T \quad f_N^T). \quad (13)$$

(12) 및 (13)을 로봇의 관절공간에서의 동역학 식에 대입하여 다음과 같은 확장 공간에서의 동역학 식을 얻을 수 있다.

$$f_{Ec} = \Lambda_E(q)\,\ddot{x}_E + \Gamma_E(q, \dot{q})\,\dot{x}_E + f_E \quad (14)$$

위에서 가중행렬 W가 관절공간의 관성행렬이므로

$$\begin{aligned} \Lambda_E(q) &= \begin{bmatrix} \Lambda(q) & 0 \\ 0 & \Lambda_N(q) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} (JH^{-1}J^T)^{-1} & 0 \\ 0 & V^T H V \end{bmatrix} \quad (15) \\ \Gamma_E(q, \dot{q}) &= J_E^{-T}\{C(q, \dot{q}) - HJ_E^{-1}\dot{J}_E\}J_E^{-1} \end{aligned}$$

이 된다. 여기서 Λ는 의사 운동에너지 행렬(pseudo-kinetic energy matrix)[7]이라 하고 Λ_N은 영공간 관성행렬(null space inertia matrix)이라 정의한다. 또 위의 식에서 중력항은 외란 관측기에 의해 충분히 상쇄되었다고 가정하였기 때문에 무시하였다.

(15)는 블록 대각행렬(block diagonal matrix)의 형태를 지니고 있으므로 이는 관성적으로 말단장치와 영공간의 운동을 분리시키게 된다. 또 (14)는 최소 매개변수에 의해 작업공간과 영공간의 운동을 표현할 수 있는 여유자유도 매니퓰레이터에 대한 완전한 형태의 동역학을 나타낸다. 여기서 한가지 주목할 사항은 외부와의 접촉력 f는 영공간의 운동에는 영향을 주지 않는다는 것이다.

V. 관성적으로 분리된 확장 임피던스 제어기(IDExIC)

일반적으로 임피던스 제어는 말단장치의 동적 거동을 외부와의 접촉력에 대해 관성, 댐핑과 강성(stiffness)의 관계로 구현하는 제어방법을 말한다. 이와 비슷하게 (14)를 이용하여 확장 작업공간에서의 원하는 임피던스 관계를 다음과 같이 생각할 수 있다.

$$\alpha_F f_E = M_{Ed}\,\ddot{e}_E + \overline{B}_{Ed}\,\dot{e}_E + K_{Ed}\,e \quad (16)$$

위에서 M_{Ed}, $\overline{B}_{Ed} \in R^{n \times n}$와 $K_{Ed} \in R^{n \times m}$은 확장 작업공간에서 각각의 원하는 질량, 댐핑, 강성행렬을 나타내고 α_F는 힘에 대한 비례상수를 표현하며 $\dot{e}_E = (\dot{e}, \dot{e}_N)$, $e = x_d - x$, $\dot{e}_N = \dot{x}_{Nd} - \dot{x}_N$이다. 한가지 주목할 사항은 영공간의 운동은 속도 수준에서 정의되기 때문에 일반적으로 x_N은 존재하지 않으며 이 때문에 확장 작업공간에서의 강성행렬 K_{Ed}는 다음과 같이 주어진다.

$$K_{Ed} = \begin{bmatrix} K_d \\ 0 \end{bmatrix}, \quad K_d \in R^{m \times m}. \quad (17)$$

초기의 임피던스 제어에 관련된 연구들은 원하는 임의의 임피던스를 실현할 수 있다는 것을 가정하였다. 그러나 W. S. Newman 등에 의해 임의의 임피던스를 구현하는 것은 불가능하고 동적 거동에 제한적인 성능을 갖는다는 것을 보였다[10,13]. 이러한 점을 고려하기 위해 $M_{Ed} = \Lambda_{E(q)}$와 $\overline{B}_{Ed} = \Gamma_E(q, \dot{q}) + B_{Ed}$로 놓았다. 또한 이 경우 힘에 대한 비례상수 α_F는 0과 2사이의 값을 취해야 하며 접촉력과 α_F 사이에는 반비례 관계가 성립한다[8]. 즉 α_F가 0에 가까울수록 접촉력은 커지게 된다.

이상의 결과를 이용하면 확장 작업공간에서의 임피던스 제어명령은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} f_{Ec} = {} & \Lambda_E\{\ddot{x}_{Ed} - \dot{J}_E\,\dot{q}_d\} + B_{Ed}\,\dot{e}_E \\ & + K_{Ed}e + (1-\alpha_F)f_E + \Gamma_E(q, \dot{q})\,\dot{x}_{Ed}, \end{aligned} \quad (18)$$

여기서 $B_{Ed} = diag[B_d, B_N]$.

(18)을 관성적으로 분리된 확장 임피던스 제어기(Inertially Decoupled Extended Impedance Controller)라 부르고 이를 앞서 제안된 운동량 궤환 외란 관측기와 결합하면 다음과 같은 관절입력을 얻을 수 있다.

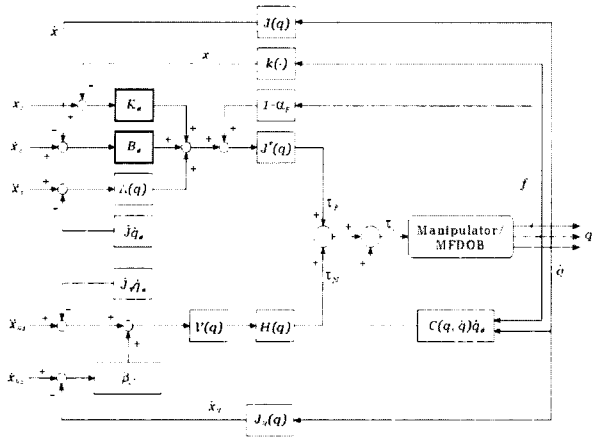


그림 2. 운동량 궤환 외란 관측기를 이용한 확장 임피던스 제어기의 구성도.

Fig. 2. Block diagram of extended impedance controller with MFDOB.

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau}_c &= \boldsymbol{\tau}_P + \boldsymbol{\tau}_N + \boldsymbol{C}_o(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}})\,\dot{\boldsymbol{q}}_d \\ \boldsymbol{\tau} &= \boldsymbol{\tau}_c + \hat{\boldsymbol{\tau}}_{dist}, \end{aligned} \tag{19}$$

여기서 $\dot{\boldsymbol{q}}_d$는

$$\dot{\boldsymbol{q}}_d = \boldsymbol{J}_H^{+}(\boldsymbol{q})\,\dot{\boldsymbol{x}}_d + \boldsymbol{V}(\boldsymbol{q})\,\dot{\boldsymbol{x}}_{Nd} \tag{20}$$

로 주어지고, $\boldsymbol{B}_N = \beta_N \boldsymbol{\Lambda}_N(\boldsymbol{q})$으로 할 때 (19)에서의 $\boldsymbol{\tau}_P$와 $\boldsymbol{\tau}_N$은 다음과 같은 형태를 갖는다.

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau}_P &= \boldsymbol{J}^T(\boldsymbol{q})\{\boldsymbol{\Lambda}(\boldsymbol{q})[\ddot{\boldsymbol{x}}_d - \dot{\boldsymbol{J}}\dot{\boldsymbol{q}}_d] + \boldsymbol{B}_d\dot{\boldsymbol{e}} \\ &\quad + \boldsymbol{K}_d\boldsymbol{e}\} + (1-\alpha_F)\,\boldsymbol{J}^T\boldsymbol{f} \\ \boldsymbol{\tau}_N &= \boldsymbol{H}(\boldsymbol{q})\,\boldsymbol{V}(\boldsymbol{q})\{\ddot{\boldsymbol{x}}_{Nd} + \beta_N\dot{\boldsymbol{e}}_N - \dot{\boldsymbol{J}}_N\dot{\boldsymbol{q}}_d\}. \end{aligned} \tag{21}$$

그림 2는 제안된 확장 임피던스 제어기와 운동량 궤환 외란 관측기를 결합한 전체시스템의 구성도를 보인다.

VI. 실험적 검증

이 장에서는 제안된 강인한 임피던스 제어기의 성능을 실험으로 보인다. 성능비교를 위해 제안된 외란 관측기가 사용되지 않은 경우에는 다음과 같이 피드포워드(feed-forward) 방식을 이용한 마찰력 보상을 추가하였다.

$$\boldsymbol{\tau}_f = \boldsymbol{C}_f sgn(\dot{\boldsymbol{q}}_d) + \boldsymbol{V}_f\dot{\boldsymbol{q}}_d \tag{22}$$

여기서 $\boldsymbol{C}_f$와 $\boldsymbol{V}_f$는 각각 Coulomb과 점성마찰 계수행렬을 나타내고 이들은 실험적으로 구하였다.

1. 시스템 구성

실험장치는 그림 3과 같은 평면 3자유도의 여유자유도 로봇을 사용하였다. 각 관절은 직접구동 모터에 의해 구동되고 관절 각의 측정을 위해 고 정도의 인코더(encoder)가

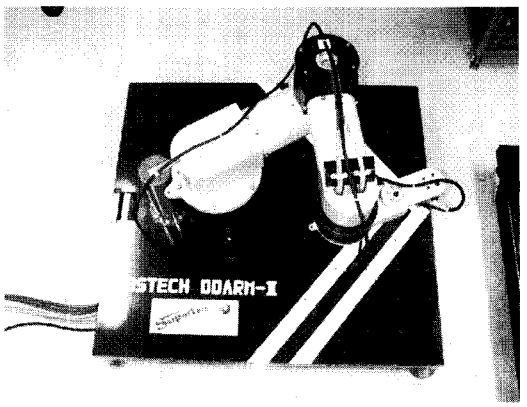


그림 3. 평면 3 자유도 여유자유도 매니퓰레이터.

Fig. 3. Three-link planar redundant manipulator.

사용되었다. 기구학적 동역학적 변수들은 CAD 도면을 근거로 얻었고 그 값들을 표 1에 명시하였다 표 1에서 ℓ_i는 i번째 링크(link)의 길이를 ρ_i는 i번째 링크의 끝에서 무게 중심(center of mass)까지의 거리를 m_i는 i번째 링크의 질량을 I_i는 i번째 링크의 관성모멘트(moment of inertia)를 나타낸다. 마지막 링크의 끝단에 외부와의 접촉력을 측정하기 위해 3축 힘 센서가 장착되었고 약 1cm 두께의 알루미늄판이 외부환경을 표현하기 위해 사용되었다. 로봇의 기준 좌표로부터 알루미늄판의 거리는 정확하게 알려지지 않았다(약 0.725m). 펜티엄 PC(MMX-233MHz)를 전체 제어기로 사용하였고 모든 제어프로그램은 C-언어를 사용하여 작성되었으며 1kHz의 샘플링 속도로 제어하였다. 관절의 속도는 위치정보를 수치 미분하여 사용하였다.

표 1. 3 자유도 평면 여유자유도 로봇의 변수들.

Table 1. Parameters of three-link planar redundant manipulator.

Link no.	ℓ_i(m)	ρ_i(m)	m_i(kg)	I_i(kgm2)
1	0.350	0.241	7.56	0.215
2	0.350	0.201	3.85	0.134
3	0.265	0.154	1.25	0.023

2. 실험 결과

그림 4에 말단장치가 수행해야 할 작업을 표시하고 임피던스 제어의 변수들은 다음과 같이 설정하였다.

$$\alpha_F = 0.9, \quad \boldsymbol{K}_d = 900\,\boldsymbol{I}_2, \quad \boldsymbol{B}_d = 50\,\boldsymbol{I}_2.$$

영공간 제어를 위한 두 번째 작업으로 기구학적 성능지수(kinematic performance index)의 최적화 문제를 생각하였고 이를 위해 능숙성 지수(manipulability measure)를 사용하였다[14]. 원하는 영 공간의 운동은 다음과 같이 주어진다[8].

$$\dot{\boldsymbol{x}}_{Nd} = \varkappa\,\boldsymbol{\Lambda}_N^{-1}(\boldsymbol{q})\,\boldsymbol{V}^T\nabla m(\boldsymbol{q})$$

여기서 영공간의 제어 변수 $\varkappa = 20$, $\beta_N = 20$으로 설정하였다.

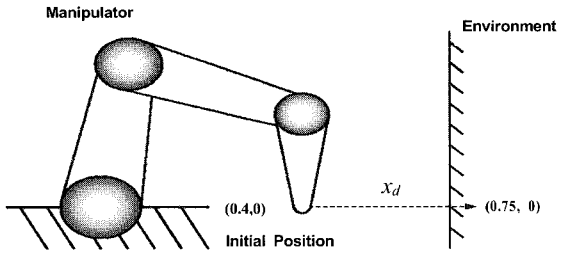


그림 4. 임피던스 제어를 위한 작업 사양.
Fig. 4. Desired task of impedance control.

표 2. Q-필터의 cut-off 주파수.
Table 2. Cut-off frequency of $\boldsymbol{Q}$.

Joint No.	1	2	3
$1/\tau_i$[rad/s]	50	50	50

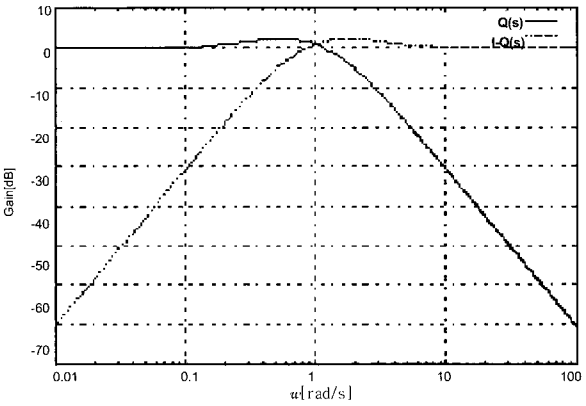


그림 5. $\boldsymbol{Q}$-필터의 bode plot.
Fig. 5. Bode plot of $\boldsymbol{Q}$-filter.

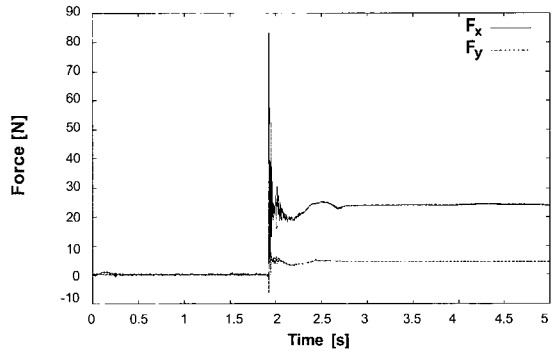
제안된 외란 관측기를 사용하기 위해 다음과 같은 3차의 $\boldsymbol{Q}$-필터를 사용하였다.

$$\boldsymbol{Q}(s) = diag\left\{\frac{\tau_i s+1}{(\tau_i s)^3+3(\tau_i s)^2+3(\tau_i s)+1}\right\}, \quad i=1,2,3$$

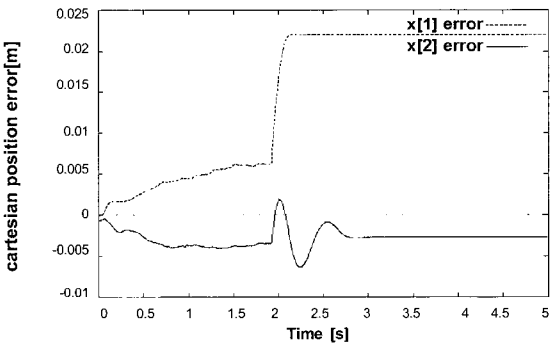
위에서 τ_i는 Q-필터의 cut-off 주파수이고 그 값들은 표 2에 나타내었고 $\tau_i=1$s 인 경우의 bode plot을 그림 5에 보인다.

2.1 임피던스 제어 성능

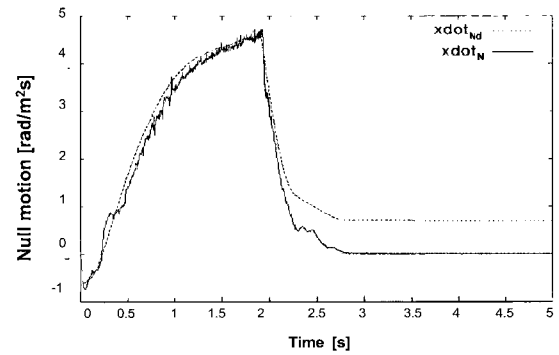
말단장치의 작업은 처음 2초 동안에는 (0.4, 0)~(0.75, 0)m의 직선궤적을 추종하고 뒤의 3초 동안은 마지막 위치를 유지하는 것이다. 초기의 관절 위치는 초기 말단장치의 위치, 즉 $\boldsymbol{x}_d=(0.4,\ 0)$ m를 만족하는 임의의 값으로 설정하였다. 그림 6과 7에 그 실험결과를 보인다. 그림 6은 제안된 운동량 궤환 외란 관측기가 사용되지 않은 경우이고 그림 7은 사용된 경우의 결과이다. 그림 6과 7의 (a)를 비교할 때, 제안된 외란 관측기를 사용하였을 경우가 외부와의 충돌 직후 좀 더 심한 진동을 보이는 것은 $\boldsymbol{Q}$-필터의 대역폭(bandwidth)과 이에 따른 위상 지체(phase lag) 때문이다. 그러나 정상 상태(steady state)에서의 정적 임피던스 관계를 생각하면 접촉력은 다음의 관계에 의해 주어지고 $f_x=K_x\delta_x/\alpha_F\approx 21.6$ N, 이를 볼 때 제안된 외란 관측기를 사용한 경우가 좀 더 정확한 임피던스 관계를 유지한다는 것을 알 수 있다.



(a) 접촉력

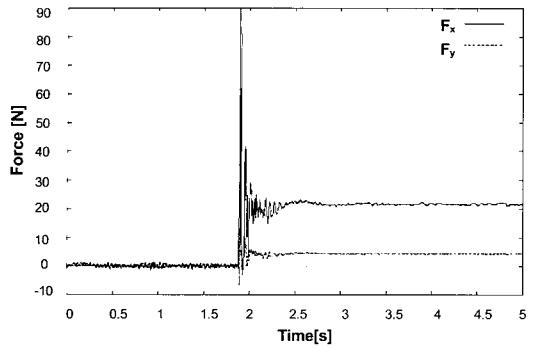


(b) 위치 오차

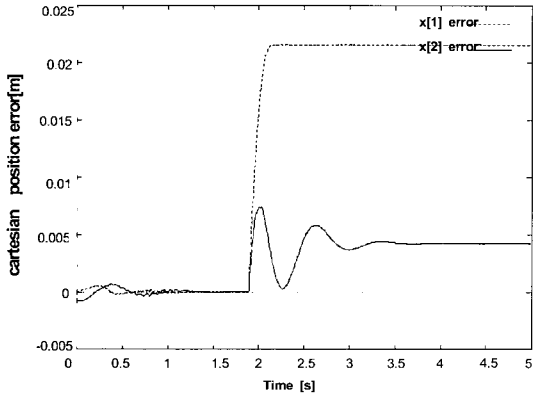


(c) 영 운동

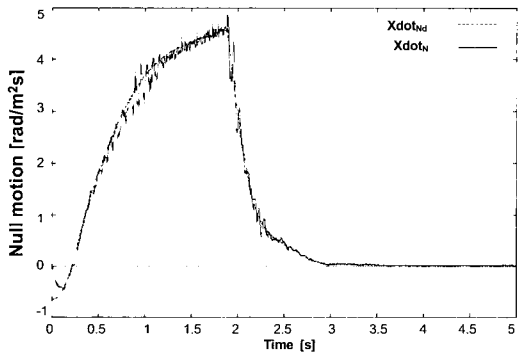
그림 6. 임피던스 제어의 성능 (MDFOB를 사용하지 않았을 때).
Fig. 6. Impedance control performance.(without MFDOB).



(a) 접촉력



(b) 위치오차



(c) 영 운동

그림 7. 임피던스 제어의 성능 (MFDOB를 사용했을 때).
Fig. 7. Impedance control performance (with MFDOB).

그림 (b)들은 작업수행중의 말단장치의 오차를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 외란 관측기가 사용된 경우는 충돌 전 처음 2초 동안에 위치 오차가 0으로 수렴하지만 사용하지 않은 경우는 그렇지 못한 것을 알 수 있다. 또 외부와의 충돌에 의해 약 2초 이후 x축의 위치 오차가 갑자기 증가하는 것을 알 수 있다. 그림 (c)에는 영 운동의 추종 성능을 보인다. 이 경우에도 제안된 외란 관측기를 사용한 경우가 우수한 성능을 발휘하는 것을 알 수 있다.

Ⅶ. 결론

본 논문에서는 [5]의 운동량 궤환 외란 관측기와 작업공간과 영공간의 운동을 동시에 표현할 수 있는 확장 작업공간의 동역학을 이용하여 여유자유도 매니퓰레이터의 강인한 임피던스 제어기를 설계하고 그 성능을 실험적으로 입증하였다. 사용된 외란 관측기는 로봇 동역학에 존재하는 비 선형적인 항들을 외란 관측기의 틀에서 다룰 수 있기 때문에 서보 제어기의 구성에 있어 좀 더 유연성을 줄 수 있다. 여유자유도 매니퓰레이터의 운동을 효과적으로 표현하기 위해 관절공간의 가중치 분해를 통한 확장 작업공간에서의 동역학이 이용되었다[8]. 운동량 궤환 외란 관측기(MFDOB)와 확장 작업공간에서의 동역학적 표현을 결합하여 관성적으로 분리된 강인한 임피던스 제어기를 설계하여 말단장치뿐만 아니라 영공간의 운동을 효과적으로 제어할 수 있고 이를 3자유도 평면 직접구동 여유자유도 매니퓰레이터에 적용하여 그 성능을 검증하였다.

참고문헌

[1] N. Oda, T. Murakami and K. Ohnishi, "Observer based local torque optimization in redundant manipulator," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Industrial Electronics*, pp. 1915-1921, 1996.

[2] N. Oda, T. Murakami and K. Ohnishi, "Null space damping method for robust controlled redundant manipulator," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Industrial Electronics*, pp. 755-759, 1994.

[3] N. Oda, H. Ohta, T. Murakami and K. Ohnishi, "A robust impedance control strategy for redundant manipulators," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Industrial Electronics*, pp. 1254-1259, 1995.

[4] M. Nakano, K. Ohnishi and K. Miyachi, "A robust decentralized joint control based on interference estimation," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 326-331, 1987.

[5] Y. Oh, W. K. Chung, Y. Youm and I. H. Suh, "Disturbance observer based motion control of redundant manipulators using weighted decomposition," *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1781-1786, 1997.

[6] D. N. Nenchev, "Redundancy resolution through local optimization: a review," *J. of Robotic Systems*, Vol. 6, No. 6, pp. 769-798, 1989.

[7] O. Khatib, "A unified approach for motion and force control of robot manipulators: The operational space formulation," *IEEE J. of Robotics and Automation*, Vol. RA-3, No. 1, pp. 43-53, Feb., 1987.

[8] Y. Oh, W. K. Chung and Y. Youm, "Extended impedance control of redundant manipulators based on weighted decomposition of joint space," *J. of Robotic Systems*, Vol. 15, No. 5, pp. 231-258, 1998.

[9] N. Hogan, "Impedance control: An approach to manipulation," Part Ⅰ-Ⅲ, *Trans. of the ASME J. of Dyn., Syst., Meas., and Contr.*, Vol 107, No. 1, pp. 1-24, Mar., 1985.

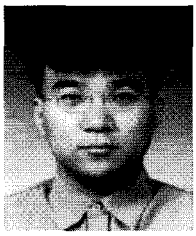
[10] W. S. Newman and M E. Dohring, "Augmented impe -dance control: An approach to compliant control of kinematically redundant manipulators," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 30-35, 1990.

[11] Z. X. Peng and N. Adachi, "Compliant motion control of kinematically redundant manipulators," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 9, No. 6, pp. 831-837, Dec., 1993.

[12] T. Tsuji and A. Jazidie, "Impedance control of redundant manipulators: An approach to joint impedance regulation utilizing kinematic redundancy," *J. of the Robotic Society of Japan*, Vol. 12, No. 4, pp. 609-615, 1994(in Japanese).

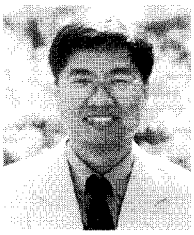
[13] W. S. Newman, "Stability and performance limits of interaction controllers," *Trans. of the ASME J. of Dyn., Syst., Meas., and Contr.*, Vol. 114, pp. 563-570, Dec., 1992.

[14] T. Yoshikawa, "Analysis and control of robot manipulators with redundancy," *The First Int. Symp. of Robotic Research*, M. Brady and R. Paul, Eds. Cambridge, MA:MIT Press, pp. 735-747, 1984.



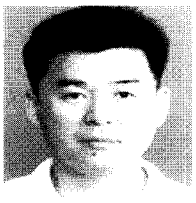
오 용 환

1969년 1월 18일생. 1991년 포항공과대학교 기계공학과 졸업. 동대학 석사(1993). 동대학원 박사(1999). 현재 한국과학기술연구원지능제어연구센터 연구원. 관심분야는 여유자유도 로봇의 힘 제어. 비주얼 서보 및 인간형 로봇.



정 완 균

1959년 2월 24일생. 1981년 서울대 기계설계학과 졸업. 한국과학기술원 석사(1983). 동대학원 박사(1987). 현재 포항공과대학교 기계공학과 교수. 관심분야는 여유자유도 로봇의 제어. 로봇의 힘 제어 및 원격제어.



오 상 록

1958년 6월 7일생. 1980년 서울대 전자공학과 졸업. 한국과학기술원 석사(1982). 동대학원 박사(1987). 현재 한국과학기술연구원지능제어연구센터 센터장. 관심분야는 로봇의 지능제어. 행위기반제어 및 생체모방시스템.