

단일 물체 조작을 위한 두 협조 로봇의 협조제어

A Coordination Control Methodology for Two Cooperating Arms Handling a Single Object

여 희 주
(Hee-Joo Yeo)

Abstract : A hybrid position/force control scheme to regulate the force and position by dual arms is proposed, where two arms are treated as one arm in a kinematic viewpoint. The force error calculated from the information of two force/torque sensors attached to the end of each arm is transferred to minimum configuration space coordinates, and then is distributed to total system joint coordinates. The position adjustment at the total configuration coordinates is computed based on the effective compliance matrix with respect to total joint coordinates, which is obtained by coordinate transformation between the task coordinates and the total joint coordinates. The proposed scheme is applied to sawing task. When the trajectory of the saw is planned to follow a line in a horizontal plane, 2 position parameters are to be controlled(*i.e.*, two translational positions). Also, a certain level of contact force has to be controlled along the vertical direction(*i.e.*, minus z -direction) not to lose the contact with the object to be sawn. We experimentally show that the performances of the velocity and force response are satisfactory. The proposed hybrid control scheme can be applied to arbitrary two cooperating arm systems, regardless of their kinematic structure and the number of actuated joints.

Keywords : two cooperating arms, hybrid position/force control

I. 서론

자동화 공장에서의 산업용 로봇의 응용은 단순한 물체를 집어 옮기기 또는 간단한 작업물 분류를 넘어서 연속된 경로를 오차없이 추적하며 작업을 하는 아크 용접작업이나 고도의 정밀을 요하는 조립작업에 까지 확대되고 있다. 그러나 이들 대부분은 한 대의 로봇을 이용하여 작업을 하고 있어 그 응용 범위가 제한되어 있다. 따라서, 한 대의 로봇으로 운반하기에는 무겁고, 부피가 크고, 특수한 모양의 작업물은 두대 혹은 그 이상의 로봇이 협조 작업하는 것을 필요로 한다. 또한, 여러 대의 로봇이 하나의 작업을 분담하여 수행하면 생산성을 향상시킬 수 있을 뿐 아니라 단일 로봇이 수행할 수 없는 복잡하고 어려운 작업도 가능하다.

두대 혹은 다중 로봇은 시스템이 운동할 수 있는 모빌리티(mobility)보다 더 많은 액츄에이터를 가지고 있기 때문에 여유구동 시스템(force-redundant system)이 된다. 따라서 여유구동은 두 팔간의 힘 분배 문제를 야기하며 이는 힘 공유(load sharing)와 힘 평형(load balancing)의 두 주제로 분류할 수 있다. 다중 로봇이 잡고 있는 물체에 가해지는 동적부하와 외부의 힘은 여러 가지 기준에 따라 각 로봇에 균등하게 분배할 수 있다 [4,5,6]. 내력은 시스템의 운동에는 영향을 미치지 않지만 시스템의 균형을 잡아주는 요소로 로봇이 잡은 물체를 압착하고, 휘게 하고, 변형시키는데 유용하게 사용될 수 있고, 내부적으로 강성 효과를 나타낸다 [7,8].

지금까지 다중로봇을 제어하기 위한 방법으로서 마스

터/슬레이브 제어구조(master/slave control scheme)와 비-마스터/슬레이브 제어구조(non-master/slave control scheme)가 제안되었다. 그러나 마스터/슬레이브 제어구조는 원하는 위치 정보를 마스터 로봇에 의해서만 알 수 있기 때문에 힘 추적 시에 시간 지연에 의한 문제가 있으며, 두 로봇간의 힘 분배의 잇점을 살리지 못하는 단점이 있다. Uchiyama[6]는 두 로봇의 양 손목에 힘/토크 센서를 장착하여 동시에 힘과 위치를 조정하는 대칭적 하이브리드 위치/힘 제어 알고리즘(symmetrical hybrid position/force control algorithm)을 제안하였으며, Bonitz 와 Hsia[10]는 두 협조 로봇의 내력에 기초한 임피던스 제어(internal force-based impedance control) 기법을 제안하였다. 그러나 다중 로봇에 대한 선행 연구들은 몇 개의 동종 로봇으로 구성된 병렬 매니퓰레이터 [7,8]만 취급하였고 비 동종 매니퓰레이터간의 협조 제어는 고려하지 않았다. 또한, 로봇의 관절 액츄에이터 중에 일부가 동작되지 않는 경우에 대한 연구도 미진하였다.

따라서, 본 논문에서는 로봇 시스템의 기구적 구조에 상관없이 적용할 수 있는 하이브리드 위치/힘 제어 알고리즘을 제안하였다. 접근 방법의 주된 아이디어는 두 로봇이 기구적으로 단일 로봇처럼 고려된다. 즉, 다시 말하면 두 로봇은 협조적인 방법보다는 단일화된 하나의 로봇으로 동작된다. 두 로봇의 엔드-이펙트에 부착된 힘/토크 센서로부터 계산된 힘 에러는 우선 힘제어를 위한 독립 관절(independent joint set)인 최소 액츄에이터 좌표계(minimum actuator coordinates)로 전달되고, 다시 전체 액츄에이터 시스템 좌표계(total actuator system coordinator)로 분배된다. 힘 제어에서, 전체 액

츄에이터 좌표계에서의 위치 보정은 작업 좌표계와 전체 액츄에이터 좌표계 사이의 좌표변환에 의해 얻어지는 전체 액츄에이터 좌표계에 대한 컴플라이언스 매트릭스를 기초로 하여 계산된다. 위치제어에서, 출력 위치와 위치 에러는 조인트 엔코더의 정보로부터 계산되고, 전체 액츄에이터 시스템 좌표계에서의 위치 보정은 시스템의 역기구학과 내부 기구학 관계로부터 계산된다. 제안된 접근 방법의 타당성을 보이기 위해 톱질 작업에 대한 하이브리드 위치/힘 제어 실험을 수행하였다. 즉, 두대 로봇이 물체를 견고하게 잡고 작업 환경과의 접촉 상황에서 일정한 힘을 유지하며, 수평방향으로 톱질을 하는 작업으로써 제안된 알고리즘의 유효성을 보인다.

II. 두대 로봇의 기구학 모델링

다중 로봇 혹은 두대 로봇과 같은 일반적인 폐쇄체인 시스템(closed-chain system)의 기구학은 두 단계로 나뉘어진다. 첫번째 단계는 독립관절 집합(independent joint set)과 종속관절 집합(dependent joint set)사이의 내부 관계를 나타낸다. 이에 대한 기구학적 관계는 다중 체인 사이의 고차 기구학적 구속 방정식에 의해 얻어진다. 두번째 단계에서는 엔드-이펙트 운동 좌표계와 독립관절 셋 사이의 관계를 다룬다. 이러한 관계는 첫번째 단계에서 결정된 내부 기구학적 관계를 하나의 오픈-체인 기구학 모델에 접목시킴으로써 얻어진다.

1. 내부 기구학(internal kinematics)

다음은 3 차원 작업 공간에서 공통의 물체를 붙잡고 작동하는 두 개의 직렬 체인으로 구성된 두대 로봇의 내부 기구학에 대하여 논의 하고자 한다. 각 체인은 다른 관절 수를 가질 수 있다. 각 암이 엔드-이펙트 좌표계에서 같은 속도와 가속도를 갖고 있기 때문에, 엔드-이펙트 좌표계는 내부적인 기구학 관계를 결정하기 위하여 중간적인 좌표계로서 선택된다. 엔드-이펙트의 속도벡터 (\dot{u})는 r 개의 오픈 체인 구조의 관절속도 (${}_r\dot{\phi}$)의 향으로 직접 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\dot{u} = [{}_r J]_r \dot{\phi} \quad r = 1, 2, \quad (1)$$

여기서 $[{}_r J]$ 는 엔드-이펙트 좌표계 벡터를 관절 좌표계 벡터로 관련짓는 1차 기구학적 영향 계수(KIC) 매트릭스를 나타낸다. (1)은 관절 속도 셋 중의 하나를 다른 셋으로 관련 짓는 N 개의 대수학 방정식을 의미하며, 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$[{}_1 J]_1 \dot{\phi} = [{}_2 J]_2 \dot{\phi}. \quad (2)$$

1 차 KIC 매트릭스를 열 벡터 형태로 보이기 위해, (2)을 다음과 같이 나타낸다.

$$[1g_1 : 1g_2 : \dots : 1g_{M_1}] \begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \\ \vdots \\ \dot{\phi}_{M_1} \end{bmatrix} =$$

$$[{}_2 g_1 : {}_2 g_2 : \dots : {}_2 g_{M_2}] \begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \\ \vdots \\ \dot{\phi}_{M_2} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

여기서 M_r 은 r번째 개루프 체인의 관절 수를 나타낸다. 이제 (3)은 각 체인의 독립, 종속 관절 속도 셋에 따라 다음과 같이 재배치되고 재그룹 될 수 있다.

$$[{}_1 J_a]_1 \dot{\phi}_a + [{}_1 J_p]_1 \dot{\phi}_p = [{}_2 J_a]_2 \dot{\phi}_a + [{}_2 J_p]_2 \dot{\phi}_p. \quad (4)$$

(4) 다음의 (5)과 같은 단일한 매트릭스 방정식으로 정의되며

$$[A] \dot{\phi}_p = [B] \dot{\phi}_a, \quad (5)$$

여기에서 [A]와 [B]는 (6), (7)과 같다.

$$[A] = [[{}_1 J_p] : -[{}_2 J_p]], \quad (6)$$

$$[B] = [-[{}_1 J_a] : [{}_2 J_a]]. \quad (7)$$

(4), (5)에서, $\dot{\phi}_a$ 와 $\dot{\phi}_p$ 는 각각 M차원 독립관절 속도 벡터와 ($M_1 + M_2 - M$)차원 비 독립관절 속도벡터를 나타낸다. [A]와 [B]는 각각 ($M_1 + M_2 - M$) \times ($M_1 + M_2 - M$)와 $M \times M$ 매트릭스를 나타낸다. 그러므로, 매트릭스 [A]의 역행렬이 특이 행렬이 아니라고 가정하면 다음과 같이 관계되어 구해진다.

$$\dot{\phi}_p = [A]^{-1} [B] \dot{\phi}_a = [G_a^p] \dot{\phi}_a, \quad (8)$$

여기서 $[G_a^p]$ 는 이중암 시스템의 1차 내부 기구학적 영향계수(IKIC) 매트릭스를 나타낸다

독립관절 속도벡터($\dot{\phi}_a$)와 비 독립관절 속도벡터($\dot{\phi}_p$)와의 관계식인 $[G_a^p]$ 는 아래와 같이 나타내어진다[7,8].

$$\dot{\phi}_p = [G_a^p] \dot{\phi}_a, \quad (9)$$

여기서 $[G_a^p]$ 는 두대 로봇시스템의 1차 내부 기구학적 영향계수(internal kinematic influence coefficient) 매트릭스를 나타낸다[7,8]. ϕ 는 시스템의 전체 관절 집합을 나타낸다고 가정하면, 독립관절 집합과의 관계는 (10)으로 표현된다.

$$\dot{\phi} = [G_a^{\phi}] \dot{\phi}_a, \quad (10)$$

여기에서 $M_r (= (M_1 + M_2) \times M)$ 의 차원을 가지는 $[G_a^{\phi}]$ 은 아래와 같이 정의된다.

$$[G_a^{\phi}] = \begin{bmatrix} [I] \\ [G_a^p] \end{bmatrix} \quad (11)$$

2. 정방향 기구학(forward kinematics)

r번째 체인(${}_r\phi$)의 관절들은 독립, 종속 관절들로 구성되기 때문에, ${}_r\dot{\phi}$ 는 다음과 같이 시스템의 독립 관절 향으로 표현할 수 있다.

$${}^r\dot{\phi} = \begin{bmatrix} {}^r\dot{\phi}_a \\ {}^r\dot{\phi}_p \end{bmatrix} = [{}^rG_a^{\phi}] \dot{\phi}_a, \quad (12)$$

여기서, $[{}^rG_a^{\phi}]$ 는 (10)에서 ${}^r\dot{\phi}_p$ 에 해당되는 항들을 추출함으로써 얻어진다. 따라서, 공통의 물체에 한 순방향 기구학은 1차 IKIC를 하나의 개회로 직렬 체인에 접속함으로써 다음과 같이 최종적으로 얻어진다.

$$\dot{u} = [{}^rJ] {}^r\dot{\phi} = [G_a^u] \dot{\phi}_a, \quad (13)$$

여기서

$$[G_a^u] = [{}^rJ] [G_a^{\phi}]. \quad (14)$$

본 장에서 소개한 기구학 방법론은 두대 로봇시스템 뿐만 아니라, 일반적인 다중 로봇에게도 적용될 수 있다.

III. 두대 로봇의 컴플라이언스 모델링

본 절에서는 두대 로봇에 대한 일반적인 컴플라이언스 모델을 유도하고, 돌질 작업에서의 힘 제어 알고리즘에 적용한다. 독립 관절 셋에 대한 시스템의 관성부하 (effective inertial load)를 T_a^* , 독립관절과 비 독립관절에서의 부하를 각각 T_a , T_p , 외부에서 가해진 힘을 T_u^L , 그리고 중력을 T_{ϕ}^G 라고 정의하면, 시스템의 평형 상태에서 독립관절에 대한 부하는

$$T_a^* = [G_a^{\phi}]^T T_{\phi} - [G_a^u]^T T_u^L + [G_a^{\phi}]^T T_{\phi}^G = 0. \quad (15)$$

여기서, 최소 액츄에이터만이 구동된다고 가정하면, 구동되는 관절과 외부에서 시스템에 가해진 힘들과의 정적인 힘 관계식은 다음과 같다.

$$T_a = [G_a^u]^T T_u^L - [G_a^{\phi}]^T T_{\phi}^G. \quad (16)$$

(16)의 선형화된 형태는 다음과 같이 구해지며

$$\delta T_a = [G_a^u]^T \delta(T_u^L) + \left[\frac{\partial [G_a^u]^T}{\partial \phi_a} \delta \phi_a \right] T_u^L - [G_a^{\phi}]^T \delta(T_{\phi}^G) - \left[\frac{\partial [G_a^{\phi}]^T}{\partial \phi_a} \delta \phi_a \right] T_{\phi}^G. \quad (17)$$

힘 평형 상태에서의 시스템에 외란이 가해질 때, 결과적인 상태는 시스템의 독립 관절에 대한 스프링 효과로 모델될 수 있다. 그래서 시스템의 강성 방정식은 (17)의 양쪽 항을 ϕ_a 에 대해 미분하여 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$[K_{aa}] = -\frac{\partial T_a}{\partial \phi_a} = [G_a^u]^T [K_{uu}] [G_a^u] - \frac{\partial [G_a^u]^T}{\partial \phi_a} T_u^L - [G_a^{\phi}]^T [V] [G_a^{\phi}] + \frac{\partial [G_a^{\phi}]^T}{\partial \phi_a} T_{\phi}^G. \quad (18)$$

윗 식에서는 다음의 관계식이 활용된다.

$$\delta T_a = -[K_{aa}] \delta \phi_a, \quad (19)$$

$$\delta T_u^L = -[K_{uu}] \delta u, \quad (20)$$

그리고

$$\delta T_{\phi}^G = -[V] \delta \phi, \quad (21)$$

여기서 $[V]$ 는 $M_r \times M_r$ 차원을 지닌 대각블록 행렬이고, 각 블록 행렬은 다음 식과 같다.

$$[V_r] = \sum_{i=1}^{M_i} \frac{\partial [{}^iG_{\phi}^c]^T}{\partial {}^i\phi} ({}^iF_G) \quad r=1, 2. \quad (22)$$

(18) 우변의 두번째, 세번째 그리고 네번째 항은 각각 외부에서 가해진 부하와 중력 부하로 인한 추가의 강성 효과를 나타낸다. 또한, (18)를 최소 입력에 기초를 둔 컴플라이언스 관계식으로 표현하면

$$[C_{aa}] = [K_{aa}]^{-1}. \quad (23)$$

전체 구동의 경우에, 최소 액츄에이터의 부하는 다음 식으로 표현되며

$$T_a = [G_a^{\phi}]^T T_{\phi}, \quad (24)$$

이 식의 미분 관계식은 다음과 같다.

$$\delta T_a = [G_a^{\phi}]^T \delta T_{\phi}. \quad (25)$$

미소한 움직임의 경우 (10)의 등가 미분 관계식은 아래와 같으며

$$\delta \phi = [G_a^{\phi}] \delta \phi_a \quad (26)$$

여기서 $\delta \phi$ 와 $\delta \phi_a$ 는 다음 관계에 의해 나타낼 수 있다.

$$\delta \phi = -[C_{\phi\phi}] \delta T_{\phi}, \quad (27)$$

$$\delta \phi_a = -[C_{aa}] \delta T_a. \quad (28)$$

(25)을 (28)에 대입하고 (27)와 (28)을 다시 (27)에 대입하면, 아래 식과 같이 전체 액츄에이터(total actuator)와 최소 액츄에이터(minimum actuator) 사이의 컴플라이언스 관계가 구해진다.

$$[C_{\phi\phi}] = [G_a^{\phi}] [C_{aa}] [G_a^{\phi}]^T. \quad (29)$$

일반적으로 현재 산업용 매니플레이터들은 위치 제어 장치이므로 작은 위치 에러에도 큰 힘 에러를 유발시킨다. 그래서, 힘 제어될 양을 위치로 보상하여 힘 에러를 없애는 컴플라이언스 제어방법이 적용되어 왔다. 그러나, 환경강성은 (18)에서 보여지는 것과 같이 외부에서 가해진 힘(externally applied force), 중력(gravity load)과 관절부하(joint load)에 비해 매우 크기 때문에(i.e., 50,000 N/m 이상) (29)을 다음 (30)처럼 단순화 할 수

있다.

$$[C_{\phi\phi}] = [G_a^\phi] [J_1]^{-1} [K_{inv}]^{-1} [J_1]^{-T} [G_a^\phi]^T \quad (30)$$

대부분의 실제적인 응용 중에서, 환경강성의 정확한 크기는 미리 알 수 없다. 따라서, 알지 못하는 또는 변화하는 환경강성의 크기를 추정하기 위해서 많은 연구자들이 로봇 다이내믹스나 적응 알고리즘으로 강성값을 알아내기 위한 여러 가지 방법을 제안하였다[4,12].

IV. 두대 로봇의 하이브리드 제어 알고리즘

1. 두대 로봇의 힘 제어 알고리즘

대상이 되는 두대 로봇은 그림 1에서와 같이 4축의 수평 다관절 로봇(SCARA)과 5축의 산업용 수직 다관절 로봇(PT200V)으로 구성된다. 이러한 시스템이 공통의 물체를 견고히 붙잡고 작업을 하는 경우에는 시스템의 모빌리티가 3이 되므로 최소한 세 개의 입력이 필요하며 이에 따라서 여섯 개의 방향(3방향의 병진운동, 3방향의 회전운동)으로 동작을 할 수 있는 출력공간에서 단지 3방향으로만 독립적으로 운동을 제어할 수 있다. 따라서, (13)의 \dot{u} 과 $[G_u^*]$ 는 각각 6×1 과 6×3 의 차원을 지닌다.

톱질작업에서는 수직방향(음의 Z-방향)으로 일정한 힘을 제어하는 것을 목표로 한다. 따라서, 힘 벡터(δF)와 최소 액츄에이터 좌표계에서의 토크(δT_u) 사이의 관계는 다음의 식으로 표현되는데

$$\delta T_u = [J_i]^T \delta F \quad (31)$$

여기서, $[J_i]$ 은 (13)에서 $[G_u^*]$ 의 첫번째(F_1), 두번째(F_2), 그리고 세번째(F_3) 행으로 구성되는 3×3 차원을 지니는 행렬을 나타내고, δF 는 3×1 힘 벡터를 나타낸다.

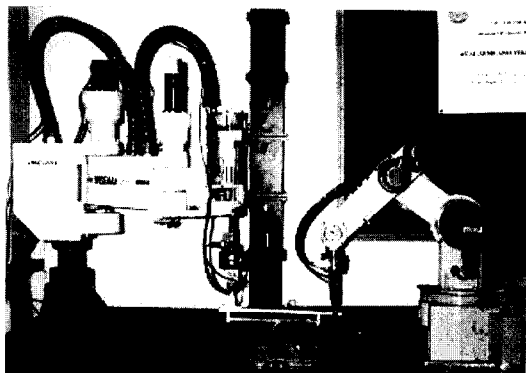


그림 1. 하이브리드 제어 실험을 위한 실험 환경.

Fig. 1. Experimental set-up for hybrid control experiment.

톱질작업에서는 힘 제어 되는 위치(contact point)가 톱질하는 동안에 계속적으로 변화하므로, 로봇의 끝점에서 힘 제어하는 기존의 힘 제어 방식을 사용해서는 안되고 힘 제어하는 위치와 관절 입력력의 관계를 나타내는 식 (31)에서의 자코비안 J_i 을 계속적으로 바꿔 주어야 한다.

모든 입력에 대한 부하(δT_ϕ)는 최소 입력관절과 전체 입력관절 사이의 관계로부터 계산된다. 여기서 선형 또는 비선형 제어기의 적용으로 힘 오차 보상을 해줄 수 있다. (25)의 일반 해는 다음과 같이 구해지고

$$\delta T_\phi = \left([G_a^\phi]^T \right)^+ \delta T_a + \left([I] - \left([G_a^\phi]^T \right)^+ [G_a^\phi]^T \right) \epsilon \quad (32)$$

여기서 $\left([G_a^\phi]^T \right)^+$ 는 $[G_a^\phi]^T$ 의 의사역행렬(pseudo-inverse) 헤이고, 첫째 항은 각각 최소놈 해(minimum norm solution)를 나타내고, 둘째 항은 내력을 나타낸다. 특수해가 최소놈 해를 나타내는 반면, 제차 해(homogeneous solution)는 내력을 나타내는데, 이는 시스템의 운동에는 영향을 미치지 않지만, 로봇이 잡은 물체를 압착하고, 휘게하고, 변형시키는데 유용하게 사용될 수 있다.

특히, 제차 해는 몇몇 부가적인 역할을 제공한다. 비록 조인트 기준의 방법과 대상 물체 기준의 방법이 내력제어로 사용될 수 있지만, 보다 일반적인 기구학에 적용할 수 있기 때문에 조인트 기준의 부하 분배방법(joint-based load distribution)을 사용한다. 제안된 접근 방법은 조인트 공간에서 부과하는 제한 조건에 기초한다. 특히, 다음의 제한조건을 고려한다[11,33].

$$[G(\phi)] \delta T_\phi = \alpha \quad (33)$$

여기에서 $[G(\phi)] \in R^{(M_i - M) \times M_i}$ 와 α 는 알고 있는 시간 증속의 벡터이다(M_i : 전체 관절의 수, M : 두대 로봇 시스템의 모빌리티를 나타냄). G 의 행과 α 에서의 대응되는 요소에 나타내어지는 (33)의 제한조건들은 서로 독립이다. 이것은 G 가 풀랭크(full rank)를 가져야만 한다는 것을 의미한다. G 와 α 는 수행될 부가적인 작업의 형태에 따라 선택되어야 하고, 부하 분배 때 사용되는 기준을 나타낸다.

이것이 수행되었다고 가정할 때, (33)에서 나타내어진 부가적인 작업뿐만 아니라 최소놈 해를 만족 시키도록 (32)에서 ϵ 를 선택하기를 원한다.

(33)에서 가능한 $[G]$ 에 대한 많은 선택의 예를 들 수 있다. 예를 들어, $[G]$ 의 행을 $(0 \dots 0 \ 1 \ 0 \dots 0)$ 로 선택하고(여기에서 $[G]$ 의 행은 i 번째 위치에서 1을 가진다) 원하는 힘/토크를 i 번째 액츄에이터에 대해 대응되는 요소를 α 로 두면 원하는 힘/토크로 그 액츄에이터를 유지시키는 제약 조건을 부과함을 의미한다. 즉, 다시 말하면 $[G]$ 가 $(M_i - M)$ 행을 갖고, 시스템 내에 남아 있는 자유도 $(M_i - M)$ 가 부가적인 동작 제어에 사용될 수 있다. 예를 들어, i 번째 조인트 액츄에이터가 고장이 났을 경우, i 번째 액츄에이터를 자유로운(free) 상태로 해주는 것이 바람직하다. 이 경우 α 에 대응되는 요소는 그 액츄에이터가 무 부하 힘/토크에 해당한다. 또한, 두대의 로봇이 일정한 비율로 부하 부담을 나누는 알고리즘도 고려할 수 있는데, $[G]$ 와 α 가 이 요구 조건을 만족시키도록 결정할 수 있다. 위의 예 이외에도, 액츄에이터의 그룹을 포함하는 보다 복잡한 기준(criteria)이 충분히 적용 될 수 있다.

그림 3 은 제안된 제어기의 블록선도를 나타낸다. 이제 (30)의 컴플라이언스 관계에 따라, 관절각들은 힘 오차가 제거될 수 있도록 제어된다. 또한 오차를 보상하고 좋은 힘 응답을 위하여 단순한 PID 힘 제어기를 사용하였다.

두대 로봇과 환경에 대해 상호 느끼는 힘과 모멘트는 각각의 로봇 팔 손목에 부착된 두 개의 힘/토크 센서를 이용하여 측정할 수 있고 잡은 대상물의 질량은 무시할 수 있는 정도로 작다고 가정한다. 이때, 측정된 힘/토크 벡터와 작업 환경과의 상호 작용하는 힘/토크 벡터 사이의 관계는 그림2로 부터 유도되며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} F \\ N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 & I & 0 \\ S_1 & I & S_2 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ N_1 \\ F_2 \\ N_2 \end{bmatrix} \quad (34)$$

여기서 행렬 S_i 는 i 번째 로봇의 힘 벡터 F_i 와 환경으로 부터 미치는 모멘트 N 사이의 관계를 나타낸다.

2. 두대 로봇의 위치 제어 알고리즘

일반적으로, 톱질작업은 평면에서의 한 직선을 따라 이루어진다. 이 작업을 위해서는 x축과 y축에 대한 병진운동 성분(translational motion)과 z축에 대한 회전운동 성분(roll motion)에 대한 제어가 필요하다. 따라서,

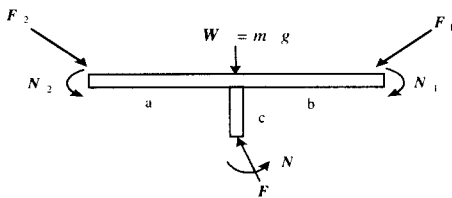


그림 2. 대상 물체의 표현.

Fig. 2. Description of the grasped object.

(13)로 부터 위치 제어에 관한 성분들을 뽑아서 정리하면

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\omega}_z \end{bmatrix} = [J_2] \dot{\phi}_a \quad (35)$$

여기서, $[J_2]$ 은 $[G_a^u]$ 의 첫번째(V_1), 두번째(V_2), 그리고 여섯번째(ω_z) 행을 뽑아서 이루어진다. 주어진 톱의 동작에 대하여 (35)으로 부터 $\dot{\phi}_a$ 를 구하고 (10)에 따라서 모든 관절에서의 위치를 구한다. 그림 3의 두번째 피드백 루프는 주어진 위치제어 방식을 나타내고 있다. 또한, 위치 오차를 보상하기 위하여 PID 제어기가 사용된다. 그림 3에서 위치제어 루프와 힘 제어 루프의 출력 $\delta\phi$ 는 각각 독립적으로 환경과의 수직한 방향(움의 Z-방향)으로 일정한 힘을 유지하도록 힘 제어를 하고, 동시에 X-방향으로 왕복 운동을 하도록 한다.

위치 서보에 의해 제어되는 로봇 매니퓰레이터는 로봇의 갑작스런 출발과 정지로 인한 시작점과 끝점에서의 떨림 현상이 발생할 수 있으며, 이런 현상을 방지하

기 위하여 각 관절의 서보 제어 루프에서는 필터 다이내믹스가 포함되는데 이것은 위치 명령이 주어진 후의 로봇의 움직임에 대한 지연된 성질을 나타낸다. Exponential필터 다이내믹스, $G_E(s)$,와 전류, 속도 제어기를 포함하는 제어 시스템의 위치 서보 다이내믹스(position servo dynamics), $G_P(s)$,는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$G_E(s) = \frac{\delta q_d(s)}{\delta q(s)} = \frac{65}{s+65}, \quad (36)$$

$$G_P(s) = \frac{\delta q_a(s)}{\delta q_d(s)} = \frac{555,000(s+50)}{s^3 + 550s^2 + 333,000s + 2,775,000}$$

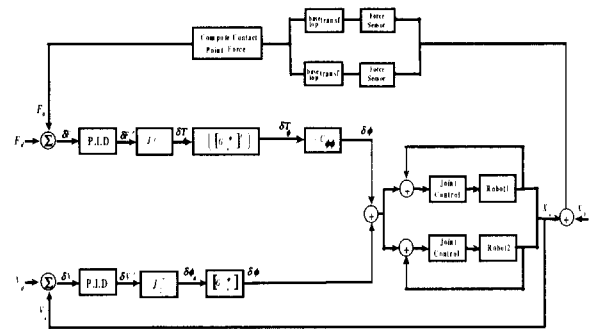


그림 3. 제안된 하이브리드 제어방식의 블록선도.

Fig. 3. Block diagram of the proposed hybrid control scheme.

여기에서 q_d, q_s 는 원하는 조인트 변위와 실제적인 조인트 변위를 나타낸다. 일반적으로, $G_P(s)$ 의 지배적인 Pole의 위치가 $G_E(s)$ 의 Pole 보다 허수축에서 멀리 떨어져 있으므로, 대부분의 로봇은 필터 다이내믹스의 영향이 지배적이다. 따라서, 높은 기어비를 가진 산업용 매니퓰레이터의 경우에는 매니퓰레이터 다이내믹스가 무시되고 단지 필터 다이내믹스만 고려된다.

V. 실험 및 결과

실험은 각각 로봇 양끝 단에 힘 센서가 장착된 수평

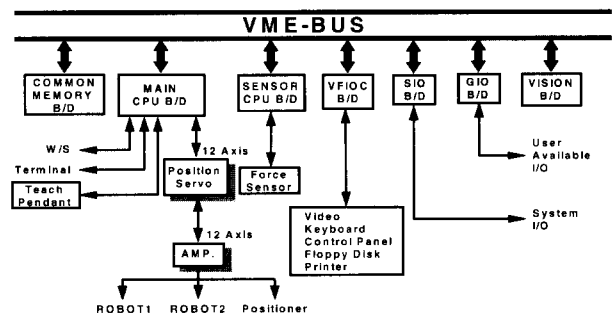


그림 4. 다중 로봇 제어시스템의 하드웨어 구조.

Fig. 4. Hardware architecture of the multi-robot controller.

다관절 로봇(SCARA)과 5축의 산업용 수직 다관절 로봇(PT200V)으로 수행하였다. 제안한 알고리즘은 C-언어로 작성하였고, 그림 4와 같이 두 장의 32비트 마이크로 프로세서 보드(FORCE30[15], KVME040)를 사용한 다중 로봇 제어기[13]를 이용하여 검증하였다. 우리가 제안한 컴플라이언스 제어를 위한 실험장치는 그림 1, 4와 같다. 비 대칭구조를 갖는 두대 로봇과 환경 사이에 상호작용하는 힘(interaction force)과 로봇의 위치를 동시에 제어하는 응용작업으로써 환경과의 수직한 방향(음의 Z-방향)으로 일정한 힘을 유지하도록 힘 제어를 하고, 동시에 X-방향으로 왕복 운동을 하도록 위치 제어를 하는 톱질 작업에 대한 실험을 수행하였다.

두대 로봇은 각각의 끝집에 힘 센서를 장착하고 있어, 로봇과 환경 사이에 상호 작용하는 힘/모멘트는 각 로봇의 끝에 부착된 F/T 센서를 이용하여 측정할 수 있다. 로봇의 미소한 움직임에 의해 생기는 힘을 실험적으로 측정함으로써 환경에 대한 강성값을 구하였다. 힘 제어에서 실험적으로 외부 환경의 강성값을 $35000N/m$ 로 측정하였다.

시스템의 시간 분석에 의하면 전체 경로생성에 $64ms$ ($15Hz$)가 소요되는데, 이는 동작 생성에 $30ms$ 사용자 인터페이스에 $34ms$ 가 걸린다. 힘 제어에서의 이러한 긴 샘플링 시간은 제안된 힘제어 알고리즘에서의 계산량 때문이다. 힘 응답에서의 상승시간은 약 1초이다. 일반적으로 톱질작업에서의 속도는 그렇게 빠르지 않다. 본 실험에서의 최대속도는 $1Hz$ 이다. 제안된 힘 제어 알고리즘이 작업 속도 보다 약 15배 빨리 수행되기 때문에 좋은 힘 응답을 얻을 수 있다. Z축의 (-)방향으로 각각 힘 $5N$ 을 유지하면

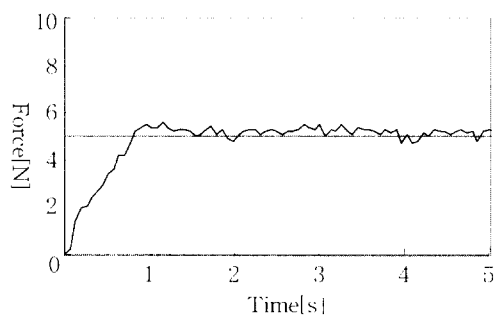


그림 5. 두대 로봇의 힘 응답 특성($5N, 0.1m/s$).
Fig. 5. Force response profile of two robots.

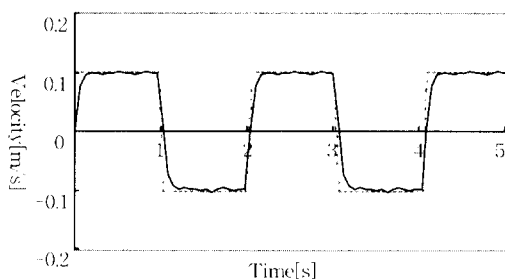


그림 6. 두대 로봇의 속도응답 특성($5N, 0.1m/s$).
Fig. 6. Velocity response profile of two robots.

서 $0.1m/s$ 의 속도로 x축과y축으로 이루어진 평면에서 톱을 일직선으로 왕복 운동하도록 제어하였다. 제안한 단일화된 컴플라이언스 협조제어 방법에 기초한 하이브리드 속도/힘 제어가 그림 5~6에서와 같이 톱질작업을 수행하는데 있어 빠르고 안정된 위치/속도 응답을 가짐을 실험적으로 보였다. 결론적으로 제안된 제어 알고리즘은 매우 만족스러운 성능을 지님을 알 수 있다.

VI. 결론

비대칭 기구학 구조를 갖는 두대 로봇에 대한 하이브리드 위치/힘 제어 알고리즘을 제안하고, 좋은 성능을 보임을 실험적으로 보였다. 제안된 방법의 주된 개념은 두대 로봇이 한대의 로봇으로 고려될 수 있다는 것이다. 제안한 방법의 두드러진 장점은 다음과 같다. (1) 두팔의 기구학적 구조나 액츄에이터의 갯수에 관계없이 적용될 수 있다. (2) 최소 액츄에이터에 의해 제어될 수 있다. (3) 구동 액츄에이터를 선택할 수 있다는 것이다. 추후과제로는 유순한 물체 조작을 위한 대상 물체 모델링 및 제어알고리즘 개발, 고장에 대한 내성연구(fault tolerance), 인간의 특성을 고려한 Human-Robot Coordination에 관한 연구가 필요하다.

참고문헌

- [1] M. T. Mason, "Compliance and force control for computer controlled manipulators," *Proc. IEEE Trans. on System, man, Cybernetics*, pp. 418-432, 1981.
- [2] M. W. Raibert and J. J. Craig, "Hybrid position/force control of manipulators," *Int. J. of Dynamic System Measurement Control*, vol. 102, pp. 120-133, 1981.
- [3] N. Hogan, "Impedance control : an approach to anipulation," Part I, Part II and Part III. *Int. J. of Dynamics System Measurement Control*, vol. 107, pp. 1-24, 1985.
- [4] M. Pelletier and L. D. Daneshmend, "An adaptive compliance motion controller for robot anipulators based on damping control," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation*, pp. 1060-1065, 1990.
- [5] T. Yoshikawa and X. Z. Zheng, "Coordinated dynamic hybrid position/force control for multiple robot manipulators handling one constrained object," *Int. J. Robotics Research*, vol. 12, no. 3, pp. 219-230, 1993.
- [6] M. Uchiyama and P. Dauchez, "A symmetric hybrid position/force control scheme for the coordination of two robots," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics Automation*, pp. 350-356, 1988.
- [7] I. D. Walker, R. A. Freeman, and S. I. Marcus, "Analysis of motion and internal loading of objects grasped by multiple coordinating manipulators," *Int. J. Robotics Research*, vol. 10, no. 4, pp. 396-409, 1991.

- [8] B.-J. Yi, I.H.Suh, and S.-R.Oh, "Analysis of a 5-bar finger mechanism having redundant actuators with applications to stiffness and frequency modulations," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation*, pp. 759-765, 1997.
- [9] K. Kosuge, et al, "Decentralized control of robots for dynamic coordination," *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 76-81, 1995.
- [10] R. G. Bonitz and T. C. Hsia, "Internal force-based impedance control for cooperating manipulators," *IEEE Trans. on Robotics & Automation*, vol. 12, no. 1, pp. 78-89, 1996.
- [11] S. Fujii and S. Kurono, "Coordinated computer control of a pair of manipulators," *Proc. 4th IFTIMM World Congress*, pp. 411-417, 1975.
- [12] I. H. Suh, K. S. Eom, H. J. Yeo, and S.-R. Oh, "Fuzzy adaptation force control of industrial robot manipulators with position servos," *Int. J. of Mechatronics*, vol. 5, no. 8, pp. 899-918, 1995.
- [13] I. H. Suh, H. J. Yeo, T. W. Kim, and S.-R. Oh, "A control system for multiple-robot manipulators: design and implementation," *Proc. IEEE Int. Conf. On 5th ISRAM*, vol. 5, pp. 279-285, 1994.
- [14] S. Tzafetas, "Industrial fuzzy expert PID control," *J. of IEEE Industrial Electronics*, vol. 15, pp. 15-30, 1979.
- [15] CPU-30 User's Manual, Force Computers, Inc., Germany, 1991.



여 회 주

1965년 5월 2일생. 1988년 한양대학교 전자공학과 졸업. (공학사) 1990년 동 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1997년 동 대학원 전자공학과 졸업(공학박사). 1997년~현재 대전대학교 전자공학과 조교수. 관심분야는 모터제어, 머신 비전, Sensor-Based 로봇제어, 다중로봇 시스템의 협조제어, 퍼지 및 뉴럴 네트워크를 이용한 지능제어.