

비대칭 구조를 갖는 두 협조 로봇의 하이브리드 위치/힘 제어에 관한 연구

A Study on the Hybrid Position/Force Control of Two Cooperating Arms with Asymmetric Kinematic Structures

°여 회주*, 서 일홍*, 이 병주**, 홍 석규*, 김 창호**

*한양대학교 전자공학과 (Tel: 0345-408-5802; Fax: 0345-408-5803, E-mail: ihsuh@shira.hanyang.ac.kr)

**한양대학교 제어계측공학과 (Tel: 0345-400-5218; Fax: 0345-406-6639, E-mail: bj@hyunp1.hanyang.ac.kr)

Abstract : A hybrid 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. Our approach is different from other hybrid control approaches which consider robot dynamics, in the sense that we employ a purely kinematic based approach for hybrid control, with regard to the nature of position-controlled industrial robots. The proposed scheme is applied to sawing task. In the sawing task, the trajectory of the saw grasped by dual arms is planned in an offline fashion. When the trajectory of the saw is planned to follow a line in a horizontal plane, 3 position parameters are to be controlled(i.e., two translational positions and one rotational position). And a certain level of contact force has to be controlled along the vertical direction(i.e., minus z-direction) not to loose the contact with the object to be sawn. Typical feature of sawing task is that the contact position where the force control is to be performed is continuously changing. Therefore, the kinematic mapping between the force controlled position and the joint actuators has to be updated continuously. The effectiveness of the proposed control scheme is experimentally demonstrated. The proposed hybrid control scheme can be applied to arbitrary dual arm systems, regardless of their kinematic structure and the number of actuated joints.

Keywords : Hybrid Position/Force Control, Sawing Task

1. 서 론

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 최소 액추에이터 좌표계(minimum actuator coordinates)로 전달되고, 다시 전체 액추에이터 시스템 좌표계(total actuator system coordinator)로 분배된다. 힘제어에서, 전체 액추에이터 좌표계에서의 위치보정은 작업 좌표계와 전체 액추에이터 좌표계 사이의 좌표변환에 의해 얻어지는 전체 액추에이터 좌표계에 대한 킴플라이언스 매트릭스를 기초로 하여 계산된다. 위치 제어에서, 출력 위치와 위치 에러는 조인트 엔코더의 정보로부터 계산되고, 전체 액추에이터 시스템 좌표계에서의 위치 보정은 시스템의 역기구학과 내부 기구학 관계로부터 계산된다.

제안된 접근 방법의 타당성을 보이기 위해 톱질 작업에 대한 하이브리드 위치/힘 제어 실험을 수행한다. 즉, 두 로봇이 물체를 견고하게 잡고 작업환경과의 접촉 상황에서 일정한 힘을 유지하며, 수평방향으로 톱질을 하는 작업으로써 제안된

2. 이중 암의 기구학적 모델링

다중 로봇 혹은 이중 로봇과 같은 일반적인 폐쇄체인 시스템(closed-chain system)의 기구학은 두 단계로 나뉘어진다. 첫 번째 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. 두 번째 단계에서는 엔드-이펙트 운동 좌표계와 독립 관절 셋 사이의 관계를 다룬다. 이러한 관계는 첫 번째 단계에서 결정된 내부 기구학적 관계를 하나의 오픈-체인 기구학 모델에 접목시킴으로써 얻어진다.

2.1 내부 기구학(Internal Kinematics)

다음은 3 차원 작업 공간에서 공통의 물체를 붙잡고 작동하는 두 개의 직렬 체인으로 구성된 이중 암의 내부 기구학에 대하여 논의 하고자 한다. 각 체인은 다른 관절 수를 가질 수 있다.

독립관절 속도벡터($\dot{\phi}_a$)와 비독립관절 속도벡터($\dot{\phi}_p$)와의 관계식은 아래와 같이 나타내어진다.

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

여기서 $[G_a^p]$ 는 이중암 시스템의 1 차 내부 기구학적 영향계수 (IKIC) 매트릭스 이다. ϕ 는 시스템이 견제 관절 배

타낸다고 가정하면, 독립관절 셋과의 관계는 식 (2)로 표현된다.

$$\dot{\phi} = [G_a^{\phi}] \dot{\phi}_a, \quad (2)$$

여기서 $[G_a^{\phi}]$ 은 아래와 같이 정의된다.

$$[G_a^{\phi}] = \begin{bmatrix} [I] \\ [G_a^p] \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.2 정방향 기구학

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

$${}_r\dot{\phi} = \begin{bmatrix} {}_r\dot{\phi}_a \\ {}_r\dot{\phi}_p \end{bmatrix} = [{}_rG_a^{\phi}] \dot{\phi}_a, \quad (4)$$

여기서, $[{}_rG_a^{\phi}]$ 는 식 (2)에서 ${}_r\dot{\phi}_p$ 에 해당되는 열들을 추출함으로써 얻어진다. 따라서, 공통의 물체에 대한 순방향 기구학은 1차 IKIC를 하나의 개회로 직렬 체인에 접속함으로써 다음과 같이 최종적으로 얻어진다.

$$\dot{u} = [{}_rJ] {}_r\dot{\phi} = [G_a^u] \dot{\phi}_a, \quad (5)$$

여기서

$$[G_a^u] = [{}_rJ][{}_rG_a^{\phi}]. \quad (6)$$

본장에서 소개한 기구학 방법론은 이중 암 뿐만 아니라, 일반적인 다중 로봇에게도 적용될 수 있다.

3. 톱질 작업에서의 힘제어 알고리즘

본절에서는 이중 암에 대한 일반적인 컴플라이언스 모델을 유도하고, 톱질 작업에서의 힘제어 알고리즘에 적용한다. 독립 관절 셋에 대한 시스템의 관성부하(effective inertial load)를 T_a^* , 독립관절과 비독립관절에서의 부하를 각각 T_a , T_p , 외부에서 가해진 힘을 T_u^L , 그리고 중력을 T_{ϕ}^G 라고 정의하면, 시스템의 평형상태에서 독립관절에 대한 부하는

$$T_a^* = [G_a^{\phi}]^T T_{\phi} - [G_a^u]^T T_u^L + [G_a^{\phi}]^T T_{\phi}^G = 0. \quad (7)$$

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

$$T_a = [G_a^u]^T T_u^L - [G_a^{\phi}]^T T_{\phi}^G. \quad (8)$$

시스템의 강성 방정식은 (8)식의 양쪽 항을 ϕ_a 에 대해 미분함으로써 다음과 같이 얻을 수 있다[2].

$$\begin{aligned} [K_{aa}] &= -\frac{\partial T_a}{\partial \phi_a} \\ &= [G_a^u]^T [K_{uu}] [G_a^u] - \frac{\partial [G_a^u]^T}{\partial \phi_a} T_u^L \\ &\quad - [G_a^{\phi}]^T [V] [G_a^{\phi}] + \frac{\partial [G_a^{\phi}]^T}{\partial \phi_a} T_{\phi}^G \end{aligned} \quad (9)$$

식 (9) 우변의 두번째, 세번째 그리고 네번째 항은 각각 외부에서 가해진 부하와 중력 부하로 인한 추가의 강성효과를 나

타낸다. 또한 식 (9)를 최소 입력에 기초를 둔 컴플라이언스 관계식으로 표현하면

$$[C_{aa}] = [K_{aa}]^{-1}. \quad (10)$$

전체 구동(full actuation)의 경우에, 최소 액추에이터의 부하는 다음 식으로 표현되며

$$T_a = [G_a^{\phi}]^T T_{\phi}, \quad (11)$$

이 식의 미분 관계식은 다음과 같다.

$$\delta T_a = [G_a^{\phi}]^T \delta T_{\phi}. \quad (12)$$

미소한 움직임의 경우 식 (2)의 등가 미분 관계식은 아래와 같으며

$$\delta \phi = [G_a^{\phi}] \delta \phi_a \quad (13)$$

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

$$\delta \phi = -[C_{\phi\phi}] \delta T_{\phi}, \quad (14)$$

$$\delta \phi_a = -[C_{aa}] \delta T_a. \quad (15)$$

식 (12)을 식 (15)식에 대입하고 식 (14)와 식 (15)을 다시 식 (13)에 대입하면, 아래 식과 같이 전체 액추에이터(total actuator)와 최소 액추에이터(minimum actuator) 사이의 컴플라이언스 관계가 구해진다.

$$[C_{\phi\phi}] = [G_a^{\phi}] [C_{aa}] [G_a^{\phi}]^T. \quad (16)$$

일반적으로 현재 산업용 매니퓰레이터들은 위치 제어장치이므로 작은 위치 에러에도 큰 힘 에러를 유발시킨다. 그래서, 힘 제어될 양을 위치로 보상하여 힘 에러를 없애는 컴플라이언스 제어방법이 적용되어 왔다. 그러나, 환경강성은 식 (9)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) 식 (16)식을 다음 식 처럼 단순화 할 수 있다.

$$[C_{\phi\phi}] = [G_a^{\phi}] [G_a^u]^{-1} [K_{uu}]^{-1} [G_a^u]^T [G_a^{\phi}]^T. \quad (17)$$

대부분의 실제적인 응용 중에서, 환경강성의 정확한 크기는 미리 알 수 없다. 그래서, 알지 못하는 또는 변화하는 환경강성의 크기를 추정하기 위해서, 많은 연구자들이 로봇 다이나믹스나 적응 알고리즘(adaptation algorithm)으로 강성값을 알아내기 위한 여러가지 방법을 제안하였다.

대상이 되는 이중 로봇은 그림 4에서와 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 Mobility가 3이 되므로 최소한 세 개의 입력이 필요하며 이에 따라서 여섯 개의 방향(3 방향의 병진운동, 3 방향의 회전운동)으로 동작을 할 수 있는 출력공간에서 단지 3 방향으로만 독립적으로 운동을 제어할 수 있다. 따라서, 식 (5)의 \dot{u} 과 $[G_a^u]$ 는 각각 6x1과 6x3의 차원을 지닌다.

톱질 작업에서는 수직방향(음의 Z-방향)으로 일정한 힘을 제어하는 것을 목표로 한다. 따라서, 힘오차 δF 에 대한 최소 입력에서의 부하 (δT_a)는 다음과 같은 관계식으로 표현되는데

$$\delta T_a = [J_1]^T \delta F, \quad (18)$$

여기서, $[J_1]$ 은 식 (5)에서 $[G_a^*]$ 의 첫번째, 두번째, 그리고 세번째 행으로 구성되는 3x3 차원을 지니는 행렬을 나타내고, δF 는 3x1 힘 벡터를 나타낸다. 톱질 작업에서는 힘제어되는 위치(contact point)가 톱질하는 동안에 계속적으로 변하므로, 로봇의 끝점에서 힘 제어하는 기존의 힘제어 방식을 사용해서는 안되고 힘제어하는 위치와 관절 입력과의 관계를 나타내는 식 (17)에서의 Jacobian $[J_1]$ 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. 식 (12)의 일반 해는 다음과 같이 구해지고

$$\delta T_\phi = \left([G_a^*]^T \right)^+ \delta T_a + \left([I] - \left([G_a^*]^T \right)^+ [G_a^*]^T \right) \varepsilon, \quad (19)$$

여기서 $\left([G_a^*]^T \right)^+$ 는 $[G_a^*]^T$ 의 의사 역행렬(pseudo-inverse) 해이고, 첫째, 둘째 항은 각각 최소놈 해(minimum norm solution)와 내력(internal load)을 나타낸다.

그림2은 제안된 제어기의 블럭선도를 나타낸다. 이제 식 (17)의 컴플라이언스 관계에 따라, 관절각 들은 힘 오차가 제거될 수 있도록 제어된다. 또한 오차를 보상하고 좋은 응답을 위하여 단순한 PID 힘 제어기가 사용된다.

이중압과 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 그림 1로부터 유도되며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} F \\ N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 & I & 0 \\ S_1 & I & S_2 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ N_1 \\ F_2 \\ N_2 \end{bmatrix} \quad (20)$$

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

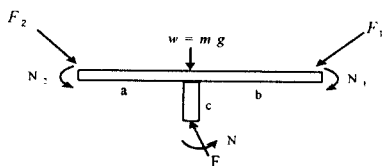


그림 1. 대상 물체의 표현
Fig. 1. Description of the grasped object.

4. 톱질 작업에서의 위치 제어 알고리즘

톱질 작업시 일반적으로 일직선을 따라서 톱작업을 하는데 이러한 경우에 식 (5)에서의 속도벡터 \dot{u} 의 성분중에서 \dot{x}, \dot{y} , 그리고 ω_z (roll motion)의 동작을 제어해야 한다. 따라서, 식 (5)로부터 위치 제어에 관한 성분들을 뽑아서 정리하면

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \omega_z \end{bmatrix} = [J_2] \dot{\phi}_a \quad (21)$$

여기서, $[J_2]$ 은 $[G_a^*]$ 의 첫번째, 두번째, 그리고 여섯번째 행을 뽑아서 이루어진다.

주어진 톱의 동작에 대하여 식 (20)으로 부터 $\dot{\phi}_a$ 를 구하고 식 (2)에 따라서 모든 관절에서의 속도를 구한다. 그림 2의 두번째 피드백 루프는 주어진 위치제어 방식을 나타내고 있다. 또한, 위치 오차를 보상하기 위하여 PID 제어가 사용된다.

각 관절의 서보 제어 루프에서는 필터 다이내믹스가 포함되는데 이것은 위치 명령이 주어진 후의 로봇의 움직임에 대한 지연된 성질을 나타낸다. Exponential 필터와 위치 서보 다이내믹스(position servo dynamics)는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$G_k(s) = \frac{\delta q_a(s)}{\delta q_d(s)} = \frac{6.5}{s + 6.5}, \quad (22)$$

$$G_p(s) = \frac{\delta q_a(s)}{\delta q_d(s)} = \frac{555,000(s + 50)}{s^3 + 550s^2 + 333,000s + 2,775,000}. \quad (23)$$

그러나 높은 기어비를 가진 산업용 매니플레이터의 경우에는 매니플레이터 다이내믹스가 무시되고 단지 필터 다이내믹스만 고려된다.

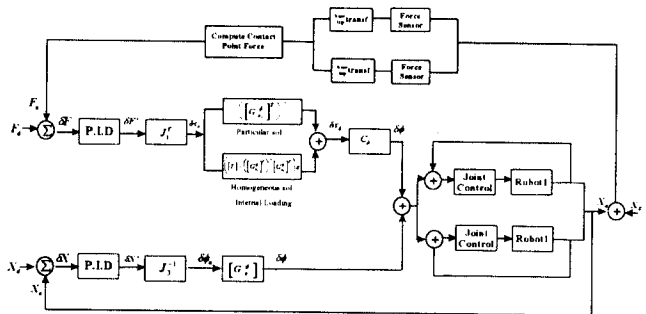


그림 2. 제안된 하이브리드 제어방식의 블럭선도
Fig.2. Block diagram of the proposed hybrid control scheme.

5. 실험 결과

실험은 각각 로봇 양 끝단에 힘 센서가 장착된 수평 다관절 로봇(SCARA)과 5축의 산업용 수직 다관절 로봇(PT200V)으로 수행하였다. 제안한 알고리즘은 C-언어로 작성하였고, 그림 2와 같이 두 장의 32비트 마이크로 프로세서 보드(FORCE30[11], KVME040)를 사용한 다중 로봇 제어기[5]를 이용하여 검증하였다. 우리가 제안한 컴플라이언스 제어를 위한 실험장치는 그림 3,4와 같다. 두 로봇으로 구성된 두 대의 로봇 암은 비대칭 구조를 갖고 있다.

샘플링 시간은 64msec이며, 그동안 힘 센서로부터 다중 로봇 제어기의 데이터 전송이 일어나고 센서 데이터를 근거로 하여 힘 및 위치제어 알고리즘이 수행된다. 비 대칭구조를 갖는 이중 로봇과 환경 사이에 상호 작용하는 힘(interaction force)과 로봇의 위치를 동시에 제어하는 응용작업으로써 톱질 작업에 대한 실험을 수행하였다. Z축의 (-)방향으로 힘

(10N)을 유지하면서 x축과 y축으로 이루어진 평면에서 톱을 일직선으로 왕복 운동하도록 제어한다.

제안한 단일화된 컴플라이언스 협조제어 방법에 기초한 정확한 하이브리드 위치/힘 제어를 그림 5, 6에서와 같이 실험적으로 우수성을 보였다.

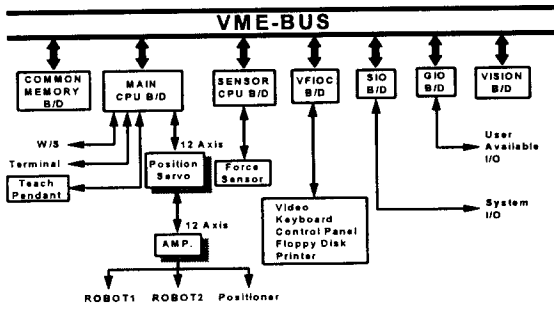


그림 3. 다중 로봇 제어시스템의 하드웨어 구조
Fig. 3. Hardware architecture of the multi-robot controller.

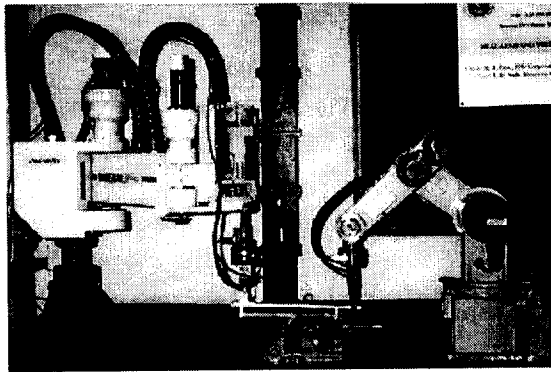


그림 4. 하이브리드 제어 실험을 위한 실험 환경
Fig. 4. Experimental set-up for hybrid control experiment.

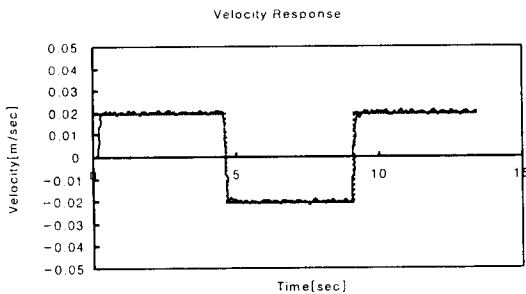


그림 5. 이중로봇의 속도응답 특성
Fig. 5. Velocity response profile of two arm robots.

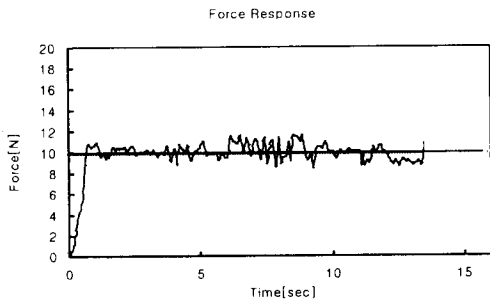


그림 6. 이중 로봇의 힘응답 특성
Fig. 6. Force response profile of two arm robots.

6. 결론

비대칭 기구학 구조를 갖는 이중 로봇의 정확한 하이브리드 위치/힘 제어를 위한 알고리즘이 제안되었다. 제안된 방법의 주된 개념은 이중 로봇이 한대의 로봇으로 고려될 수 있다는 것이다. 즉, 이중 로봇은 협조적인 방법보다는 오히려 단일화된 방식으로 동작되도록 제어된다. 제안한 방법은 톱질 작업에 적용되어 좋은 성능을 보임을 실험적으로 밝혔다.

참고문헌

- [1] B. J. Yi and R. A. Freeman, "Geometric Analysis of Antagonistic Stiffness in Redundantly Actuated Parallel Mechanisms," *Int. J. of Robotic Systems*, Vol.10, No.5, pp.581-603,1993
- [2] H.J.Yeo, I.H.Suh, B.J.Yi, "External Force Control using Cooperating Two Arms with General Kinematic Structures," *5th TEEE Int. Workshop on Robot and Human Communication*, 1996.
- [3] M. T. Mason, "Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators," *IEEE Trans. Syst., Man, Cyber.*, Vol.SMC-11, pp.418-432, June 1981.
- [4] 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.
- [5] I. H. Suh, H. J. Yeo, T. W. Kim, and S. -R. Oh, "A Control System for Multiple-Robot Manipulators ; Design and Implementation," *Proc. of the 5th ISRAM*, Vol.5. pp.279-285,1994.
- [6] T. Yoshikawa and X. Z. Zheng, "Coordinated Dynamic Hybrid Position/Force Control for Multiple Robot Manipulators Handling One Constrained Object," *Int. J. of Robotics Research*, Vol.12, No.3, pp.219-230, June 1993.
- [7] C. A. Derventzis and E. J. Davison, "Robust Motion/Force Control of Cooperative Multi-Arm Systems," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, O.K. France, pp.2230-2337, May, 1992.
- [8] Y. R. Hu, A. A. Goldenberg, and C. Zhou, "Motion and Force Control of Coordinated Robots During Constrained Motion Tasks," *Int. J. of Robotics Research*, Vol.14, No.4, pp.351-365, August 1995.
- [9] I. H. Suh, et. al., "Fuzzy Rule Based Position/Force Control of Industrial Manipulators," *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Osaka, pp.1617-1622, November 1991.
- [10] M. Uchiyama and P. Dauchez, "A Symmetric Hybrid Position /Force Control Scheme for the Coordination of Two Robots," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Philadelphia, pp.350-356, April 1988.
- [11] CPU-30 User's Manual, Force Computers, Inc., Germany 1991.