

# IMS를 위한 로봇 군 제어방법 : 이종 협조 로봇의 톱질 작업

論 文

48A-4-14

## Control Methodology of Multiple Arms for IMS : Experimental Sawing Task by Nonidentical Cooperating Arms

呂熙珠\* · 徐一弘\*\* · 李秉周\*\*\* · 吳尙錄<sup>§</sup>

(Hee-Joo Yeo · Il Hong Suh · Byung-Ju Yi · Sang-Rok Oh)

**Abstract** - Sawing experiments using a two-arm system have been performed in this work. The two-arm system under consideration consists of two kinematically-nonidentical arms. A passive joint is inserted at the end-point of one robot in order to increase the mobility up to the motion degree required for sawing tasks. A hybrid control algorithm for control of the two-arm system is designed. We experimentally show that the performance of the velocity and force response are satisfactory, and that one additional passive joint not only prevents the system from unwanted yaw motion in the sawing task, but also allows an unwanted pitch motion to be notably reduced by an internal load control. To show the general applicability of the proposed algorithms, we perform experimentation under several different conditions for saw, such as three saw blades, two sawing speeds, and two vertical forces.

**Key Words** : Dual Arms, Sawing Task, Hybrid Control

### 1. 서 론

다중 협조 로봇은 단일 로봇으로 수행할 수 없는 많은 작업들을 수행할 수 있으며, 이러한 작업들은 무겁고 부피가 큰 물체들을 나르거나 복잡한 부품을 조립하는 일 등에 유용하다. 다중 로봇 혹은 두 대 로봇은 시스템이 운동할 수 있는 모빌리티(Mobility)보다 많은 액츄에이터를 가지고 있기 때문에 여유 구동 시스템(force-redundant system)이 된다. 따라서 여유 구동은 두 팔간의 힘 분배 문제를 야기하며 이는 힘 공유(load sharing)와 힘 평형(load balance)의 두 주제로 분류할 수 있다. 다중 로봇이 잡고 있는 물체에 가해지는 동적 부하(dynamic load)와 외부의 힘(external load)은 여러 가지 기준에 따라 각 로봇에 균등하게 분배할 수 있다[10,11,13,14]. 내력(internal force)은 시스템의 운동에는 영향을 미치지 않지만 시스템의 균형을 잡아주는 요소로 로봇이 잡은 물체를 압착하고, 휘게 하고, 변형시키는 데 유용하게 사용될 수 있고, 내부적으로 강성 효과를 나타낸다[13,14].

지금까지 다중 로봇을 제어하기 위한 방법으로서 마스터

슬레이브 제어구조(master/slave control scheme)[5, 8]와 비 마스터/슬레이브 제어구조(non-master/slave control scheme)[6-7, 9-14]가 제안되었다.

그러나 이 구조는 원하는 위치 정보를 마스터 로봇에 의해서만 알 수 있기 때문에 힘 추적(force tracking) 시에 시간 지연에 의한 문제가 있으며, 두 로봇간의 힘 분배의 잊점을 살리지 못하는 단점이 있다. Uchiyama [11]는 두 로봇의 양 손목에 힘/토크 센서를 장착하여 동시에 힘과 위치를 조정하는 대칭적 하이브리드 위치/힘 제어 알고리즘(sym-metric hybrid position/force control algorithm)을 제안하였으며, Bonitz와 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(parallel manipulator)만 취급하였고 비 동종 매니퓰레이터 간의 협조 제어는 고려하지 않았다. 또한, 로봇의 관절 액츄에이터 중에 일부가 동작되지 않는 경우에 대한 연구도 미진하였다. 이러한 문제를 해결하기 위해 Yeo[14]등은 두 로봇을 이용한 톱질 작업을 위한 하이브리드 제어 방법을 제안하였다. 그러나 [14]의 실험은 고정된 환경(fixed configuration)에서 수행한 실험이기 때문에 일반적인 작업에는 적용할 수 없었다. 또한 기존의 하이브리드 제어 방식은 제어하는 두 개의 로봇이 모두 6 자유도를 지니는 경우에 대한 알고리즘이었다. 그러나, 본 논문에서 다루는 이종 로봇 시스템은 다른 자유도를 지니는 두 개의 로봇에 대하여도 일반적으로 적용할 수 있는 하이브리드 제어 알고리즘을 제안하고 있다. 이러한 경우에 작업공간에서의 자유도는 6보다 작은 경우가 존재한다. 본 논문의 경우에는 4자유도 SCARA 로봇과 5 자유도 PT200 로봇이 공동으로 물체를 잡고 작업을

\* 正會員 : 大眞大 工大 電子工學科 助教授 · 工博

\*\* 正會員 : 漢陽大 工大 電子工學科 教授 · 工博

\*\*\* 正會員 : 漢陽大 工大 制御計測工學科 助教授 · 工博

<sup>§</sup> 正會員 : 韓國科學技術研究院 知能制御 研究센터

責任研究員 · 工博

接受日字 : 1998年 5月 25日

最終完了 : 1999年 2月 10日

하는 경우에 모빌리티 해석에 의하여 3임을 알 수 있다. 그러나, 대상으로 삼고 있는 톱질에서는 최소 4 자유도가 요구되므로 여유의 수동관절을 시스템 내부에 부착하여 4 자유도 시스템을 구성하여 성공적으로 톱질 작업에서의 힘/위치 제어를 성공적으로 수행하였다는 결과를 제시하는 논문이다. 기존의 6자유도 이중 로봇 시스템에서는 세 방향의 힘과 세 방향의 위치를 작업공간에서 분리하여, 각각의 로봇에 힘분배와 위치분배가 이루어진 후에 각각 독립적으로 6 자유도 제어가 이루어지는 방식을 취하고 있다. 그러나, 시스템의 자유도가 6보다 작은 경우에는 이러한 알고리즘의 적용이 불가능하므로 전체 시스템의 기구학적 구조를 하나의 폐쇄체인 구조로 모델링하여 작업공간 자유도와 이를 제어하기 위한 최소 관절 좌표간의 기구학적 관계를 구한 후에 나머지 구동관절에 힘분배를 통해서 시스템을 제어하는 방식을 사용하여야만 한다. 이러한 점이 다른 하이브리드 제어 방식과 다른 점이 될 것이다. 기존의 방식은 작업공간 방식이라고 칭하며, 본 연구에서 제안한 방식은 관절공간 방식이라고 칭한다. 관절공간 방식이 작업공간 방식보다 일반적인 방식이라는 것은 기존의 연구에서 이미 발표된 바가 있다[13].

본 논문에서는 [14]에 대한 확장으로서, 세 종류의 톱날, 두 가지의 톱질 속도 그리고 두 가지 수직 방향의 힘을 가지고 여러가지 다른 환경하에서 실험을 행한 결과를 제시하였으며, 이로써 제안한 알고리즘의 일반적인 이용 가능성을 제시하였다. 이상과 같이 제안된 연구 결과는 Intelligent Manufacturing System(IMS)의 구현시 필요한 두 대 이상의 로봇 군 제어시스템에 효율적으로 적용될 수 있을 것이다.

## 2. 톱질 작업의 대표적인 특성

톱질 작업에서 두 로봇이 잡고 있는 톱의 경로는 오프-라인(off-line)으로 계획된다. 평면에서 한 직선을 따라 톱질 작업을 할 때, 세 방향의 운동 즉, 두 방향의 병진운동(translational motion)과 한 방향의 회전운동(rotational motion)을 제어해야 한다. 또한, 대상 물체와의 접촉을 잃지 않도록 수직 방향으로 일정한 수준의 힘이 유지되도록 제어하여야 한다. 톱질 작업에서는 접촉점이 계속해서 바뀐다는 특징을 가지고 있다. 그러므로, 작업 진행 중에는 힘 제어되는 위치와 관절 액추에이터 사이의 기구학적 관계를 계속해서 수정해 주어야 한다.

시스템의 운동 자유도는 모빌리티로 표현할 수 있다. 그림 1은 본 연구에서 대상으로 한 두 대 로봇 시스템으로서, 4 자유도의 SCARA형 로봇과 5 자유도의 수직다관절형 로봇(PT200V)으로 구성하였다. 두 로봇이 톱을 견고히 잡을 때, 시스템의 모빌리티는 3이 되므로 톱질 작업에 필요한 4방향(3방향의 위치, 1방향의 힘)을 제어하기 위하여 SCARA형 로봇의 끝 부분에 그림 2와 같이 톱 좌표계의 y축과 평행한 방향으로 수동관절(passive joint)을 추가하여 결과적으로 모빌리티가 4가 되는 시스템을 구성하였다. 본 실험에서는 부가적으로 추가한 수동 관절이 중요한 역할을 함을 알 수 있다.

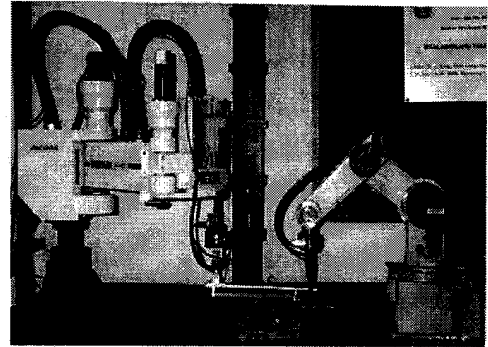


그림 1. 톱질 작업을 위한 실험 환경  
Fig. 1. Experimental set-up for sawing task.

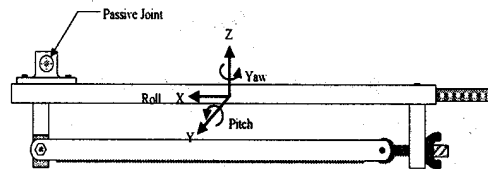


그림 2. 수동 관절과 톱의 외관  
Fig. 2. A passive joint and the saw.

## 3. 두 대 로봇의 기구학 모델링

### 3.1 내부 기구학(internal kinematics) [14]

다음은  $n$ 차원의 작업공간에서 공통의 물체를 붙잡고 작동하는 두 개의 직렬체인으로 구성된 다른 관절수를 갖는 두 대 로봇의 내부 기구학에 대하여 논의하고자 한다. 두 대의 각 로봇은 로봇 끝점에 부착된 좌표계에서 같은 위치, 속도, 그리고 가속도를 갖는다. 따라서 임의의 위치에 대하여 엔드-이펙터 좌표계는 내부적인 기구학 관계를 결정하기 위한 중간적인 좌표계(intermediate coordinate)로서 선택된다.

로봇 끝점의 속도 벡터  $u$ 는  $r$ 번째 오픈 체인의 경우에 다음과 같이 표현되며

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

여기서,  $\dot{\phi}$ 는  $r$ 번째 오픈 체인의 입력관절에서의 속도벡터를 나타내며,  $[r, J]$ 는 로봇 엔드-이펙터 좌표계 벡터를 관절 좌표계로 관련짓는 1차 기구학적 영향계수 행렬(first-order kinematic influence coefficient matrix)을 나타낸다. 식 (1)은 한 로봇의 관절속도 셀을 다른 로봇의 관절 속도 셀과 연관짓는  $N$ 개의 대수학 방정식을 의미하며, 다음과 같이 표현된다.

$$[{}_1J]_1 \dot{\phi} = [{}_2J]_2 \dot{\phi} \quad (2)$$

식 (2)에서 각 체인의 독립 관절들  $\dot{\phi}_a$  과 종속 관절들  $\dot{\phi}_b$  을 모아서 재배치하여 다음과 같은 단일한 행렬 방정식으로 표현되며

$$\dot{\phi}_b = [G_a^*] \dot{\phi}_a \quad (3)$$

여기서,  $N \times M$ 의 차원을 가지는  $[G_a^*]$ 는 두 대 로봇 시스템의 1차 내부 기구학적 영향계수(IKIC)행렬을 나타낸다.  $\dot{\phi}$ 가 시스템의 전체 관절 속도 벡터를 나타낸다고 가정하면, 독립 관절 집합과의 관계는 식 (6)과 같이 표현된다.

$$\dot{\phi} = [G_a^*] \dot{\phi}_a \quad (4)$$

여기서,  $M (= N + M) \times M$ 의 차원을 가지는  $[G_a^*]$ 는 식 (5)와 같이 정의된다.

$$[G_a^*] = \begin{bmatrix} [J] \\ [G_a^*] \end{bmatrix} \quad (5)$$

### 3.2 순방향 기구학(Forward kinematics)

$r$ 번째 체인의 관절( ${}^r\phi$ )들은 독립, 종속 관절들로 구성되기 때문에  ${}^r\dot{\phi}$ 는 다음과 같이 시스템의 독립 관절항으로 표현할 수 있으며

$${}^r\dot{\phi} = \begin{bmatrix} {}^r\dot{\phi}_a \\ {}^r\dot{\phi}_b \end{bmatrix} = [{}^rG_a^*] \dot{\phi}_a \quad (6)$$

여기서,  $[{}^rG_a^*]$ 는 식 (3)에서  ${}^r\dot{\phi}_b$ 에 해당되는 열들을 추출함으로써 얻어진다. 따라서, 공통의 물체에 대한 순방향 기구학은 1차 IKIC를 하나의 오픈 루프(open-loop) 직렬 체인에 접속함으로써 최종적으로 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \dot{u} &= [{}^rJ] {}^r\dot{\phi} = [G_a^*] \dot{\phi}_a \\ [G_a^*] &= [{}^rJ] [{}^rG_a^*] \end{aligned} \quad (7)$$

## 4. 톱질 작업에서의 힘 제어 알고리즘

### 4.1 컴플라이언스(Compliance) 모델링

본 절에서는 두 협조 로봇에 대한 일반적인 컴플라이언스 모델을 유도하고 톱질 작업에서의 힘 제어 알고리즘에 적용한다.  $\dot{u}$ 와  $[G_a^*]$ 는 3차원 공간에서 각각  $6 \times 1$ 과  $6 \times 4$ 의 차

원을 가진다. 톱질 작업에서  $z$ 방향으로의 힘만이 제어되기 때문에, 힘 벡터  $\delta F$ 와 최소 액추에이터 좌표계에서의 토크 사이의 관계식은 다음 식과 같으며

$$\delta T_a = [J_1]^T \delta F \quad (9)$$

여기서  $[J_1]$ 은  $[G_a^*]$ 의 세 번째 행을 선택하여 구한  $1 \times 4$  차원을 가진 행렬이다.

일반적인 방법으로 폐쇄 체인 매니플레이터 시스템의 동력학은 시스템의 기구학으로 기술하기 위하여 필요한 최소 입력의 수와 같은 독립 좌표계 셀에 대하여 나타내어진다. 시스템이 평형상태에 있다고 가정하면, 독립 관절 셀에 대한 시스템의 운동을 나타내는 관성력  $T_a^*$ 는 시스템의 구동력 ( $T_a$ ,  $T_b$ ), 외부에서 가해진 힘( $T_u^L$ ), 그리고 중력( $T_g^C$ )의 합으로 다음과 같이 0이 된다.

$$T_a^* = [G_a^*]^T T_a - [J_1]^T T_u^L + [G_a^*]^T T_g^C = 0 \quad (10)$$

여기서, 수동 관절이 구동되지 않기 때문에  $[G_a^*]$ 는  $[G_a^*]$ 에서 부가적인 수동 관절에 해당하는 행을 제외한 행렬을 나타내고, 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$T_a^* = \begin{bmatrix} T_a \\ T_b \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$T_a^* = [G_a^*]^T T_a^* \quad (12)$$

$$T_a^* = [({}_1T_a^*)^T ({}_2T_b^*)^T]^T \quad (13)$$

$$T_g^C = [({}_1T_g^C)^T ({}_2T_g^C)^T]^T \quad (14)$$

$${}^rT_g^C = \sum_{i=1}^M [{}^iG_i^*]^T {}^iF_G \quad r = 1, 2 \quad (15)$$

독립 관절 셋에 대한 중력부하는 관성부하와 마찬가지로 가상일에 기초한 전달 방법(virtual work-based transfer method)에 의하여, 개회로 체인들의 동력학에 구속 조건을 나타내는  $[G_a^*]^T$ 를 적용하여 구해진다.  $T_a$ 와  $T_b$ 는 각각 독립, 종속 관절에서의 구동력 벡터,  $T_a^*$ 는 전체 관절에서의 구동력 벡터, 그리고  $T_u^L$ 은 대상 물체 좌표계  $u$ 에 가해진 외부 부하 벡터를 나타낸다. 또한  ${}^iF_G$ 는  $r$ 번째 체인의  $i$ 번째 링크의 질량 중심에 가해진 중력이고,  ${}^rT_a^*$ 와  ${}^rT_b^*$ 는 각각  $r$ 번째 체인의 입력에 대한 관성력과 중력을 나타낸다. 행렬  $[{}^iG_i^*]^T$ 는  $r$ 번째 체인의  $i$ 번째 링크의 질량 중심을  $r$ 번째 체인의 입력에 관계 짓는 자코비안이다.

여기서 최소 액추에이터만이 구동된다고 가정하면, 식

(10)은 다음과 같다.

$$T_a = [J_1]^T T_u^L - [G_{a1}^*]^T T_\phi^C, \quad (16)$$

힘 평형 상태에서의 시스템에 외란이 가해질 때, 결과적인 상태는 시스템의 독립 관절에 대한 스프링 효과로 모델될 수 있다. 그래서 시스템의 강성 방정식은 식 (16)의 양쪽 항을  $\phi_a$ 에 대해 미분하여 다음과 같이 표현된다[14].

$$[K_{aa}] = -\frac{\partial T_a}{\partial \phi_a} = [J_1]^T [K_{aa}] [J_1] - T_u \frac{\partial [J_1]^T}{\partial \phi_a} - [G_{a1}^*]^T [V] [G_{a1}^*] + T_\phi^C \frac{\partial [G_{a1}^*]^T}{\partial \phi_a} \quad (17)$$

반면에 최소 입력에 대한 컴플라이언스 행렬은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$[C_{aa}] = [K_{aa}]^{-1}. \quad (18)$$

전체 관절을 구동(full actuation)하는 경우에는, 최소 액츄에이터 부하는 식 (19)와 같이 표현되며, 이 식의 미분 관계식은 식 (20)과 같다.

$$T_a = [G_{a1}^*]^T T_\phi, \quad (19)$$

$$\delta T_a = [G_{a1}^*]^T \delta T_\phi. \quad (20)$$

미소한 움직임의 경우 식 (4)의 등가 기구학 모델은 식 (21)으로 주어지고,  $\delta\phi$ 와  $\delta\phi_a$ 는 식 (22), (23)과 같이 나타낼 수 있는데

$$\delta\phi = [G_a^*] \delta\phi_a, \quad (21)$$

$$\delta\phi = -[C_{\phi\phi}] \delta T_\phi, \quad (22)$$

$$\delta\phi_a = -[C_{aa}] \delta T_a, \quad (23)$$

식 (22)에서  $[C_{\phi\phi}]$ 는 전체 액츄에이터 좌표계에 대한 컴플라이언스 행렬을 나타낸다. 식 (20)을 식 (23)에 대입하고 식 (22)와 식 (23)을 식 (21)에 대입하면 전체 액츄에이터와 최소 액츄에이터 사이의 컴플라이언스 관계가 다음과 같이 구해진다.

$$[C_{\phi\phi}] = [G_{a1}^*] [C_{aa}] [G_{a1}^*]^T. \quad (24)$$

강성이 매우 높은 외부환경에 대하여 식 (24)를 다음 식과 같이 단순화 할 수 있으며

$$[C_{\phi\phi}] = [G_{a1}^*] [J_1]^+ [K_{aa}]^{-1} ([J_1]^T)^+ [G_{a1}^*]^T, \quad (25)$$

여기서  $[J_1]^+$ 와  $([J_1]^T)^+$ 는 각각  $[J_1]$ 와  $[J_1]^T$ 의 의사역행렬(pseudo-inverse)을 나타내며, z방향으로의 힘만을 제어하므로 톱질 작업에서의  $[K_{aa}]$ 의 차원은  $1 \times 1$ 이다.

### 4.2 힘 제어 알고리즘

톱질 작업에서는, 대상 물체와 접촉을 잃지 않고 평면에 수직인 음의 z방향으로 일정한 수준의 힘을 제어하는 것을 목표로 한다. 그림 3에서 힘 오차에 대한 보상과 좋은 힘 응답을 얻기 위하여 단순한 PID 힘 제어기[15]가 사용되었다. 따라서, 보상될 힘 오차  $\delta F^*$ 에 대해 최소 입력에서의 부하  $\delta T_a$ 는 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$\delta T_a = [J_1]^T \delta F^*. \quad (26)$$

그리고, 식 (20)에 대한 일반 해는 다음과 같다.

$$\delta T_\phi = ([G_{a1}^*]^T)^+ \delta T_a + ([I] - ([G_{a1}^*]^T)^+ [G_{a1}^*]) \epsilon, \quad (27)$$

전체 입력 위치에서의 부하  $\delta T_\phi$ 는 식 (27)의 첫 번째 항에 의해 계산된다. 그리고 식 (25)의 컴플라이언스 관계에 의해, 힘 오차가 제거되도록 관절 각들은 얻어진다.

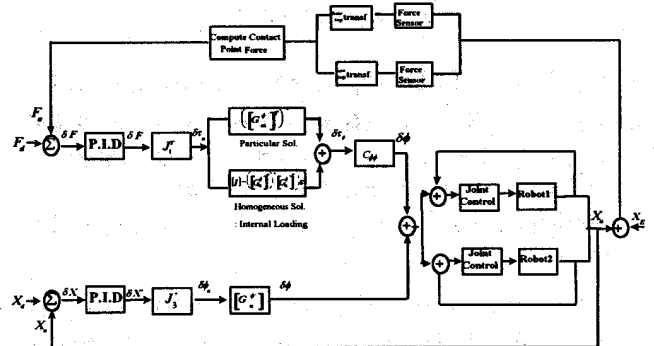


그림 3. 제안된 하이브리드 제어 방식의 블럭선도  
Fig.3. Block diagram of the proposed hybrid control scheme.

### 4.3 내력(internal force) 제어 알고리즘

일반적인 두 대 로봇 시스템은 여유 구동을 가진다. 여유 구동되는 액츄에이터가 내력 제어를 가능하게 한다. 일반적으로 조인트 기준의 부하분배(joint-based load distribution)가 유용하기 때문에, 관절 공간의 변수에 제한 조건을 부과하였으며, 다음의 제한조건(constraints)을 고려할 경우에 [13,14].

$$[G(\phi)] \delta T_\phi = \alpha, \quad (28)$$

여기서,  $[G(\phi)] \in R^{(M_1-M) \times M_1}$  와  $\alpha \in R^{M_1-M}$ 는 시간 종속

의 벡터로 주어지며,  $M$ 은 두 대 로봇 시스템의 모빌리티를 나타낸다.  $G$ 의 행과  $\alpha$ 에서의 대응되는 요소에 나타내어지는 식 (28)의 제한조건들은 서로 독립이다. 이것은  $G$ 가 풀 랭크(full rank)를 가져야만 한다는 것을 의미한다.  $G$ 와  $\alpha$ 는 수행될 부가적인 작업의 형태에 따라 선택되어야 하고, 부하 분배 때 사용되는 기준을 나타낸다.

$G$ 와  $\alpha$ 가 결정되면, 식 (28)에서 나타내어진 부가적인 작업뿐만 아니라 최소 놈 해(minimum norm solution)를 만족시키도록 식 (27)에서  $\epsilon$ 을 선택하여야 한다. 식 (27)의 첫 번째 항을  $T$ 라 정의하고 식 (27)을 식 (28)에 대입하면 식 (29) 또는 식 (30)와 같으며, 여기서  $[H]$ 는 식 (31)과 같이 정의된다.

$$[G]T + [G][I] - ([G_2^*]^T)^+ [G_2^*]^T \epsilon = \alpha, \quad (29)$$

$$[H]\epsilon = \alpha - [G]T, \quad (30)$$

$$[H] = [G][I] - ([G_2^*]^T)^+ [G_2^*]^T, \quad (31)$$

식 (27)에서 최소 놈 해와 구속 방정식을 모두 만족시키기 위한  $\epsilon$ 은 다음과 같이 구해지며

$$\epsilon = [H]^+ (\alpha - [G]T), \quad (32)$$

여기서,  $[H]^+$ 는  $[H]$ 의 의사 역행렬(pseudo-inverse)해를 나타낸다. 식 (32)에서  $[G]$ 를 다르게 선택해주는 방법이 많이 있을 수 있다. 본 논문의 실험에서는 톱질 작업중에  $y$  축 방향으로의 모멘트의 불균형에 의해 발생하는 원하지 않는 피치(pitch) 동작을 없애주기 위한 목적으로 내부 부하를 사용한다.

이제, 접촉점에서 최소 액추에이터들과 모멘트 벡터 사이의 힘 관계를 유도한다. 식 (7)로 부터, 톱의 각속도 벡터  $\omega$ 는 다음과 같이 구해지며

$$\omega = [J_2] \phi_a, \quad (33)$$

여기서,  $[J_2]$ 는  $[G_2^*]$ 의 4번째, 5번째, 6번째 행으로 구성된  $3 \times 4$  행렬이다. 힘과 속도 벡터 사이의 이중성(duality relation)으로부터 톱의 토크는 다음과 같으며

$$T_a = [J_2]^T m, \quad (34)$$

여기서,  $m$ 은 작업점에서의 모멘트 벡터를 나타낸다.  $[J_2]$ 가 비특이행렬(non-singular matrix)이라고 가정하면, 모멘트 벡터는 다음과 같이 구해진다.

$$m = ([J_2]^T)^+ T_a = ([J_2]^T)^+ [G_2^*]^T T_a = [P] T_a, \quad (35)$$

이 경우에 톱질 작업에도 불구하고  $y$  축 방향에 대한 모멘트

가 0으로 유지 되도록  $[G]$ 와  $\alpha$ 를 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$[G] = [P]_2, \quad \alpha = 0, \quad (36)$$

즉,  $[G]$ 의 2번째 항을 선택하고, 이에 해당하는  $\alpha$ 가 0이 되도록 한다. 위의 예 외에도, 액추에이터의 집합을 포함하는 좀 더 복잡한 기준이 적용될 수도 있다. 이제 식 (25)의 컴플라이언스 관계에 따라, 관절각들이 힘 오차가 제거될 수 있도록 제어된다. 두 대 로봇과 환경과의 상호 작용하는 힘과 모멘트는 각 로봇의 끝에 부착된 두 개의 F/T 센서를 이용해 측정할 수 있다[14].

### 5. 톱질 작업에서의 위치 제어 알고리즘

일반적으로, 톱질 작업은 평면에서의 한 직선을 따라 이루어진다. 이 작업을 위해서는  $x$ 축과  $y$ 축에 대한 병진운동 성분(translational motion)과  $z$ 축에 대한 회전운동 성분(roll motion)에 대한 제어가 필요하다. 따라서, 3방향에 대한 위치 벡터를 최소 액추에이터 좌표계(minimum actuator coordinate)와 연관시키는 자코비안(Jacobian)은 다음과 같으며

$$\delta X = \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta \theta_z \end{bmatrix} = [J_3] \delta \phi_a, \quad (37)$$

여기서,  $\delta X$ 는 톱의 지정된 동작  $X_a$ 과 실제로 측정된 톱의 위치  $X_a$  간의 차이를 나타내며,  $[J_3]$ 는  $[G_2^*]$ 의 1, 2, 6번째 행으로 구성된  $3 \times 4$  행렬이다.

주어진 톱의 경로에 대해,  $\delta \phi_a$ 은 식(38)에 의해 구한다.

$$\delta \phi_a = [J_3]^+ \delta X, \quad (38)$$

여기서,  $[J_3]^+$ 는  $[J_3]$ 의 의사 역행렬이고, 모든 관절에서의 미소 변위각은 식 (4)에 의해 구해진다. 하나의 수동 관절을 제외한 모든 관절은 각 관절 모터에 의해 구동된다. 비록 최소 액추에이터에 의해서만 동작을 할 수 있지만, 여유 관절은 부하분배(load sharing)의 역할을 할 수 있다. 이러한 의미에서 볼 때, 수동 관절(passive joint)이 부하분배의 역할을 하지는 않지만, 두 로봇으로 이루어진 기구학적 폐쇄 체인의 관계식에 의해 움직인다. 그림 3은 제한된 제어기의 블록도이다. 위치 오차를 보상하고 좋은 위치 응답을 위하여 PID 제어가 사용된다.

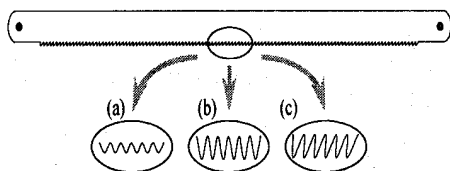
### 6. 실험 및 결과

톱질 작업은 하나의 부가적인 수동 관절을 가진 두 대의 로봇에 의해 수행되었고, 각 로봇의 기구학 매개변수는 [14]에서 사용한 매개변수와 동일하다. 이러한 구조에서 모빌리

티는 4가 된다. 그리고 많은 가능한 독립관절 셋(independent joint set)이 있지만, PT200V 로봇의 베이스에서부터 4개의 축을 독립관절 셋으로 선택하였다. 두 대 로봇은 각각의 끝집에 힘 센서를 장착하고 있어, 로봇과 환경사이에 상호 작용하는 힘/모멘트는 각 로봇의 끝에 부착된 F/T센서를 이용하여 측정할 수 있다. 그리고 두 대의 32비트 마이크로프로세서 보드(FORCE30[12], KVME040)가 사용되었다. 하나의 보드는 경로 생성, 각 관절 제어, 사용자 인터페이스 등을 위한 주 CPU 보드이고, 다른 하나는 센서에서 데이터 추출, 센서 데이터 처리 및 제어 데이터를 주 CPU 보드에 전송하는 등의 역할을 한다.

시스템의 시간분석에 의하면 전체 경로 생성에 64[msec] (15Hz)가 소요되는데, 이는 동작 생성에 30[msec], 사용자 인터페이스에 34[msec]가 걸린다. 힘 제어에서의 이러한 긴 샘플링 시간은 제안된 힘 제어 알고리즘에서의 계산량 때문이다. 힘 응답에서의 상승시간은 약 1[sec]이다. 일반적으로, 톱질 작업에서의 속도는 그렇게 빠르지 않다. 본 실험에서의 최대 속도는 1[Hz]이다. 제안된 힘 제어 알고리즘이 작업 속도보다 약 15배 빨리 수행되기 때문에 좋은 힘 응답을 얻을 수 있다. 이때 만족스런 수행 결과는 작업자에 의해 실제 환경의 강성 값이 주어졌을 때에만 얻을 수 있다.

본 실험에서는 환경에 가해진 변위에 대한 힘을 측정함으로써 실험적으로 환경 강성의 크기를 추정한다[4]. 실험적으로 측정된 작업 대상 물체의 강성의 크기는 35,000[N/m]이었다. 실제적으로, 측정된 강성은 환경강성, 로봇 팔의 강성, 힘/토크 센서의 강성이 서로 혼합되어 나타난 것이다. 톱질 작업 수행 시 여러가지 요인에 의해 영향을 받을 수 있다. 본 논문에서는 중요한 세 가지 요인을 고려한다. 그림 4에서와 같이 톱날의 모양, 그리고 톱질의 속도와 수직 방향의 힘이다. 톱질 작업에서는, 대상 물체와 접촉을 잃지 않고 평면에 수직인 방향으로 일정한 수준의 힘을 가하는 것이 필요하다. 그러나 톱에 가해지는 힘은 수직 방향의 힘과 대상 물체의 마찰 계수(friction coefficient)의 곱인 마찰력에 비례해서 증가하기 때문에 과도한 힘을 가하는 것은 바람직하지 못하다. 따라서 수직 방향의 힘의 크기는 대상 물체의 강도(strength)와 거칠기(roughness)에 따라서 결정된다. 본 실험에서는 5[N]과 10[N]의 두 가지 서로 다른 힘을 사용하였다. 톱의 움직임은 x축 방향을 따라 주기적으로 움직이도록 제어된다. 톱의 속도 역시 0.1[m/s]와 0.2[m/s]의 서로 다른 두 가지 속도를 가지고 실험을 수행하였다.



(a) 0.1mm보다 작은 길이의 톱니를 가진 대칭형 톱날  
 (b) 0.3mm의 톱니를 가진 대칭형 톱날  
 (c) 0.3mm의 톱니를 가진 비대칭형 톱날

그림 4. 톱날의 모양  
 Fig.4. Shape of saw blades

처음에는 그림 4의 (a)형태의 톱날을 0.1[m/s]의 작업 속도와 5[N]의 수직 방향의 힘을 가지고 실험을 수행하였다. 그림 5는 부가적인 수동 관절이 없을 때의 yaw 운동-그림 2의 z축 방향으로의 회전 운동-을 보여준다. 이러한 yaw 운동은 톱이 일직선 방향으로 운동하는 것을 방해하기 때문에 바람직하지 못하다. 한편, 그림 6은 시스템에 하나의 수동 관절을 추가하였을 때 원하지 않는 yaw 운동이 제거됨을 보이고 있다. 톱의 운동 방향이 바뀔 때 조그마한 교란(perturbation)이 생기는데, 이는 두 로봇 시스템의 구동 전달계에 존재하는 백래쉬(backlash) 때문이다. 또한, 원하지 않는 피치(pitch)운동-그림 2의 y축 방향으로의 회전 운동-을 없애기 위해 내력(internal load)제어가 고려되었다. 4절에서 제시한 내력에 대한 제어 알고리즘을 고려하지 않았을 경우, 그림 7에서와 같이 톱질 작업에서 주기적인 피치 운동이 일어남을 알 수 있다. 반면, 내력에 대한 제어 알고리즘을 고려하였을 경우, 그림 8에서 보는 바와 같이 피치 운동이 현저하게 줄어들음을 알 수 있다. 그림 8에서 관찰되는 작은 피치 운동은 톱의 동력학적 영향에 의한 것으로 판단된다. 또한, 그림 9와 그림 10은 각각 제안된 제어 알고리즘에 대한 힘과 속도 응답을 보이고 있다. 두 응답에서의 상승 시간(rise time)은 약 1초이고 과도 응답(transient response)은 안정하다. 따라서, 톱은 속도와 힘에서는 주어진 경로를 만족스럽게 따라감을 알 수 있다.

본 논문에서는 제안된 알고리즘의 유효성을 보이기 위해 여러 다른 요인을 고려한 실험이 수행되었다. 그림 11과 그림 12는 동일한 속도와 수직 방향의 힘이 가해진 상태에서, 그림 4의 (b)형태와 (c)형태의 서로 다른 모양의 톱날을 가진 톱을 가지고 행한 실험의 결과를 보여준다. 또한 그림 13과 그림 14는 0.2[m/s]의 속도와 10[N]의 수직 방향의 힘이 가해진 상태에서, (a)형태의 톱날을 가지고 톱질을 했을 때의 힘 응답과 속도 응답이다. 수직 방향의 힘의 크기, 톱질의 속도, 톱의 두께와 거칠기가 증가할수록 톱질의 성능(performance)이 상대적으로 저하되지만, 전체적인 톱질의 성능은 만족스러운 결과를 보여준다.

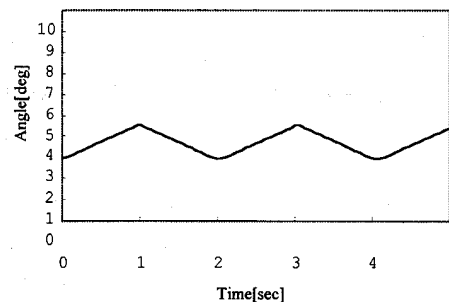


그림 5. 부가적인 수동관절이 추가되지 않았을 때의 요 운동  
 Fig.5. Yaw motion when an additional passive joint is not included.

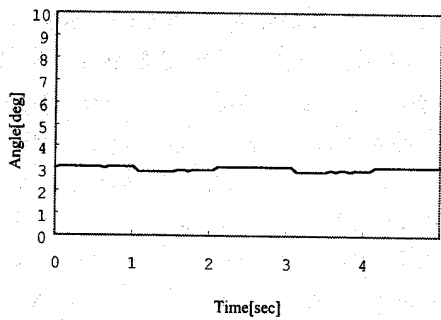


그림 6. 부가적인 수동관절이 추가되었을 때의 요 운동  
Fig.6. Yaw motion when an additional passive joint is included.

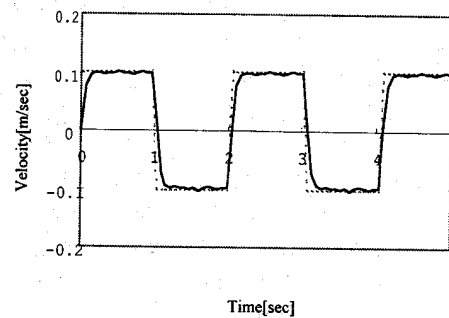


그림 10. 톱질에서의 속도 제어 ((a)형태의 톱날)  
Fig.10. Velocity control in the sawing task (Blades type (a)).

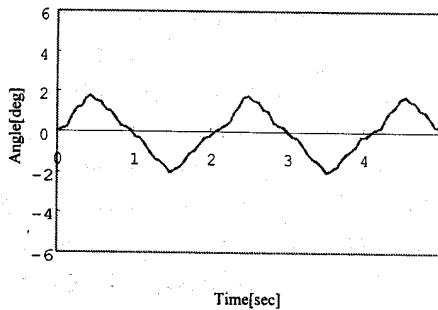


그림 7. 내력 제어를 고려하지 않았을 때의 피치 운동  
Fig.7. Pitch motion without consideration of the internal control.

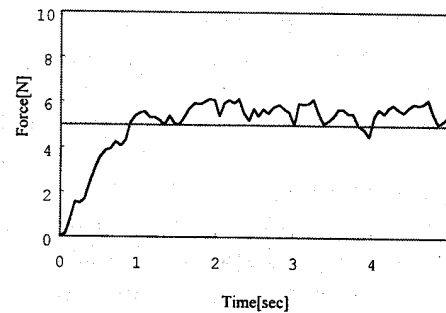


그림 11. 톱질에서의 힘 제어 ((b)형태의 톱날)  
Fig.11. Force control in the sawing task (Blades type (b)).

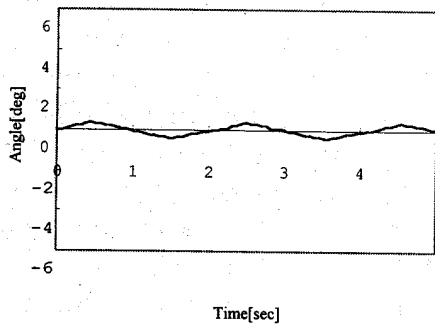


그림 8. 내력 제어를 고려했을 때의 피치 운동  
Fig.8. Pitch motion with consideration of the internal control.

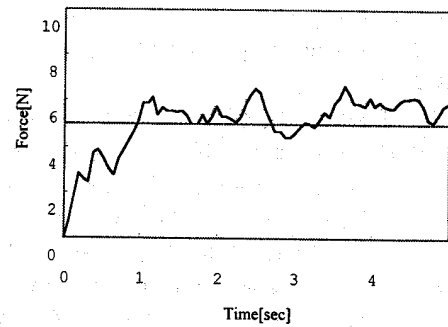


그림 12. 톱질에서의 힘 제어 ((c)형태의 톱날)  
Fig.12. Force control in the sawing task (Blades type (c)).

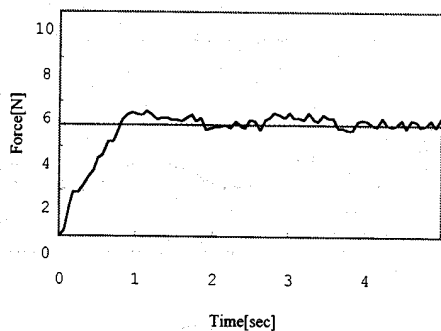


그림 9. 톱질에서의 힘 제어 ((a)형태의 톱날)  
Fig.9. Force control in the sawing task (Blades type (a)).

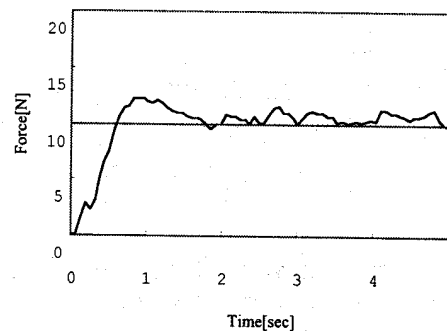


그림 13. 톱질에서의 힘 제어 ((a)형태의 톱날)  
Fig.13. Force control in the sawing task (Blades type (a)).

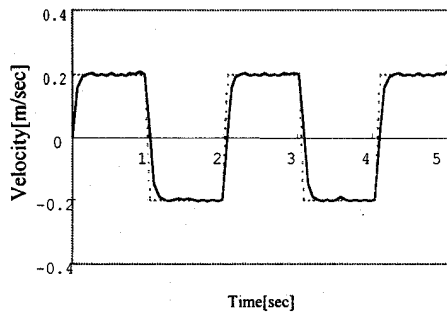


그림 14. 톱질에서의 속도 제어 ((a)형태의 톱날)  
 Fig.14. Velocity control in the sawing task (Blades type (a)).

### 7. 결 론

본 논문에서는 부가적인 수동 관절을 가진 두 대의 로봇 시스템을 가지고 톱질 작업을 할 경우의 하이브리드 제어 알고리즘을 제시하였다. 제안된 방법은 수동 관절이 존재할 경우 뿐만 아니라, 피치(pitch)운동 제어와 같은 유용한 응용 작업을 위한 내력 제어에도 이용될 수 있다. 실제 실험에서 두 대의 로봇 시스템에 수동 관절을 추가했을 때, 제안된 알고리즘은 속도 응답과 힘 응답에 있어서 만족할만한 결과를 냈을 뿐만 아니라, 원하지 않는 yaw 운동과 pitch 운동을 제거할 수 있음을 보였다. 또한 제안된 알고리즘의 유효성을 보이기 위해 여러 가지 모양의 톱, 두 가지의 톱질 속도 그리고 두 가지의 수직 방향의 힘을 가지고 실험을 행하였다.

이 논문은 1995년도 한국학술진흥재단의 대학부설연구소 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

### 참 고 문 헌

[1] M. T. Mason, "Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators," *Proc. IEEE Trans. on System, man, Cybernetics*, 1981, pp. 418-432.  
 [2] M. W. Raibert and J. J. Craig, "Hybrid Position/Force Control of Manipulators," *Int. J. of Dynamic System Measurement Control*, Vol. 102, 1981, pp. 120-133.  
 [3] N. Hogan, "Impedance Control : an Approach to Manipulation," *Part I, Part II and Part III. Int. J. of Dynamics System Measurement Control*, Vol. 107, 1985, pp. 1-24.  
 [4] 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, 1995, pp.899-918.

[5] J. M. Tao, J. Y. S. Luh, and Y. F. Zheng, "Compliant Coordination Control of Two Moving Industrial Robots," *IEEE Trans. on Robotics & Automation*, Vol.6, No.3, 1990, pp.322-330.  
 [6] M. Pelletier and L. D. Daneshmend, "An Adaptive Compliance Motion Controller for Robot Manipulators Based on Damping Control," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation*, 1990, pp.1060-1065.  
 [7] 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, 1993, pp.219-230.  
 [8] K. Kosuge, et al, "Decentralized Control of Robots for Dynamic Coordination," *Proc. IEEE/ RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 1995, pp. 76-81.  
 [9] S. Fujii and S. Kuroono, "Coordinated Computer Control of a Pair of Manipulators," *Proc. 4th IFTIMM World Congress*, 1975, pp. 411-417.  
 [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, 1996, pp. 78-89.  
 [11] 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*, 1988, pp. 350-356.  
 [12] CPU-30 User's Manual, Force Computers, Inc., Germany, 1991.  
 [13] 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, 1991, pp.396-409.  
 [14] H. J. Yeo, I. H. Suh, B. J. Yi, S. R. Oh, and B. H. Lee, "A Closed-Chain Jacobian-Based Hybrid Control for Two Coordinating Arms with a Passive Joint : An Application to Sawing Task," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation*, 1997, pp.1793-1800.  
 [15] S. Tzafetas, "Industrial Fuzzy Expert PID Control," *J. of IEEE Industrial Electronics*, Vol. 15, 1979, pp.15-30.



저 자 소 개



여 희 주(呂熙珠)

1965년 5월 2일생. 1988년 한양대학교 전자공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전자공학과 졸업(공학). 1997년~현재 대전대학교 전자공학과 조교수. 관심분야는 모터 제어, 머

신 비전, Sensor-Based 로봇 제어, 다중 로봇 시스템의 협조제어, 퍼지 및 뉴럴 네트워크를 이용한 지능 제어.

Tel : (0357) 539-1905

E-mail : hjyeo@road.daejin.ac.kr

서 일 홍(徐一弘)

전기공학회지 48A권 2호 참조

Tel : (0345) 400-5172



이 병 주(李秉周)

1984년 한양대학교 기계공학과 졸업. 1986년 텍사스 주립대(오스틴) 기계공학과 졸업(석사), 1991년 동대학원 졸업 (공학). 1992년~1995년 한국기술대학교 제어기계공학과 조교수, 1995년~현재 한양대학교

제어계측공학과 조교수. 관심분야는 Biomechanical System Modeling and Analysis, Parallel/Multiple Arm and Multi-Fingered Hands Design and Control, Haptic Interface, 여유자유도/여유구동 로봇시스템, Animation of Dynamic Systems.

Tel : (0345) 400-5218

E-mail : bj@email.hanyang.ac.kr



오 상 록(吳尙錄)

1958년 6월 7일생. 1980년 서울대 공대 전자공학과 졸업. 1982년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1987년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학). 1991년~1992년 미국 IBM Watson

연구소(Post Doc.). 현재 한국과학기술연구원(KIST) 지능제어연구센터 책임연구원.

Tel : (02) 958-5757

E-mail : sroh@amadeus.kist.re.kr