

# 케이블 구동 메커니즘을 이용한 재활 로봇의 능동 컴플라이언스 제어

강상훈<sup>†</sup>, 장평훈\*, 박형순\*\*

(2003년 12월 17일 접수, 2004년 10월 28일 심사완료)

## Active Compliance Control for the Rehabilitation Robot with Cable Driven Transmission

Sang-Hoon Kang, Pyung-Hun Chang and Hyung-Soon Park

**Key Words :** Active Compliance Control(능동 컴플라이언스 제어), Sensorless F/T sensing(힘 센서 없는 접촉 힘 추정), Rehabilitation Robot(재활 로봇), Field Evaluation(임상 평가), Impedance Control(임피던스 제어), KARES II, Time-Delay Control(시간 지연을 이용한 제어), Time-Delay Estimation(시간 지연 추정)

### Abstract

In this paper, we proposed a TDC based F/T sensorless active compliance control algorithm for a rehabilitation robot (KARES II). The preference of compliance of the disabled is presented by clinical testing at Korea National Rehabilitation Center with the disabled. The KARES II was designed to work 12 pre-defined tasks which are very essential for helping the disabled. Among the tasks, some contact tasks between the robot and the disabled exist. Therefore, TDC based F/T sensorless compliance control algorithm is developed for these tasks without additional cost. We verified the proposed algorithm with experiment. Also for the practical use, suitable compliance for contact tasks is chosen by clinical testing at Korea National Rehabilitation Center.

### 1. 서론

본 연구에서는 1) 케이블 메커니즘을 이용한 재활 로봇 KARES II (KAist Rehabilitation Engineering System for the disabled II)에의 적용을 위하여 개발된 접촉 힘 추정이 가능한 능동 컴플라이언스 (compliance) 제어를 제안하고, 2) 이를 이용한 임상 평가를 통해 얻어진 장애인들이 선호하는 컴플라이언스 레벨을 제시한다.

최근에 들어서 장애인들의 삶의 질 향상을 위한 로봇 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되어

왔다. 선진국에서는 약 10여 년 전부터 장애인을 위한 재활 로봇을 경제적으로 개발하여 왔으며,<sup>(1)</sup> 근년에 들어서 우리 나라에서도 Chang의 4명이 재활 로봇 KARES II를 개발하였다.<sup>(1,2)</sup> 이 로봇은 목표 지향 설계(TOD-Target Oriented Design)<sup>(2)</sup> 방법에 따라 꼭 수행해야 하는 12가지 작업과 로봇의 컴플라이언스 제어를 목표로 하여 이를 잘 수행하도록 설계, 제작되었다.

KARES II가 목표로 하고 있는 12가지 작업 중에는 로봇과 장애인과의 접촉이 필수적인 면도 작업과 얼굴 닦기(긁기) 작업이 존재한다. 이런 작업들의 경우, 장애인의 안전 보장과 작업의 원활한 수행을 위해서는 적절한 컴플라이언스 제어가 요구된다.

이를 구현하는데 있어서 KARES II의 경우에는 두 가지 사항이 필수적으로 고려되어야 했다.

첫 번째는 기존의 많은 컴플라이언스 제어<sup>(3-6)</sup>에

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 한국과학기술원 대학원 기계공학과  
E-mail : shkang@mecha.kaist.ac.kr  
TEL : (042)869-3266 FAX : (042)869-5226

\* 회원, 한국과학기술원 기계공학과

\*\* Rehabilitation Institute of Chicago

서 사용되고 있는 힘 센서를 사용하지 않아야 한다는 것이다. 이는 힘 센서를 로봇에 사용할 경우 1) 고가의 힘 센서로 인하여 로봇의 가격이 상승하고, 2) 배선이 복잡해져서 고장이 일어날 확률이 높아지며, 3) 로봇 관절의 유연성이 증가되어 원하지 않는 진동이 생길 가능성이 있기 때문이다.<sup>(2,7,8)</sup> 이 중에서 높은 가격은 장애인들이 실제로 로봇을 사용하는데 있어서 가장 큰 장애가 된다.

두 번째로는 실제로 장애인들이 안전하고 편하게 느끼는 컴플라이언스 크기를 조사하고, 조사된 값을 KARES II에 적용하여야 한다는 것이다. 안전하고 편하게 느끼는 컴플라이언스는 작업 별로, 개인 별로 다를 수 있다. 따라서 작업에 따라서 장애인들이 선호하는 컴플라이언스를 실 사용자들을 대상으로 조사하는 것이 요구된다.

별도의 힘 센서 없이 외부와의 접촉 힘을 추정해 내는 방법에 관해서 기존에 몇 가지 연구가 있어왔다.<sup>(9-13)</sup> 이 방법들은 외란(disturbance)을 추정하기 위하여 관측기(observer)를 사용하고, 외란으로 발생하는 토크 값과 로봇의 역 동역학(inverse dynamics)으로부터 얻어진 토크 값의 차이를 이용하여 접촉 힘의 크기를 구한다. 그러나 기존의 모든 연구는 로봇의 역 동역학을 정확히 계산하는 것을 요구하고 있고, 따라서 실제 적용에서도 역 동역학이 간단한 2~3자유도 DD-Arm 이외의 적용 사례를 찾아 볼 수가 없다. 실제로 PUMA560과 같은 6자유도 로봇은 역 동역학<sup>(14)</sup> 식 자체가 매우 복잡하며 추정해야 할 매개 변수의 개수도 매우 많다. 또한 부정확한 마찰력 모델로 인해 모델링 자체가 어려워 진다.

장애인과와의 접촉 작업에서 편하게 느끼는 컴플라이언스에 관해서는 현재까지 연구가 이루어지지 않았다. 다만, 장애인의 팔의 기능 회복을 도와주는 장치에서 어느 정도의 컴플라이언스를 주는 것이 좋은가 정도의 보고만이 있을 뿐이다.<sup>(15)</sup>

따라서 본 연구에서는 1) KARES II에서 사용하고 있는 케이블 구동 메커니즘의 높은 역 구동성(back-drivability)과 같은 기계적 장점<sup>(16)</sup>과 2) 시간 지연을 이용한 제어(TDC- Time-Delay Control)<sup>(17-19)</sup>에서 불확실한 비선형 동역학 추정에 사용되는 시간 지연 추정(TDE- Time-Delay Estimation)을 이용하여 TDC에 기반한 접촉 힘 추정이 가능한 능동 컴플라이언스 제어 기법을 개발하는 것을 목표로 한다.

또한 개발된 로봇을 장애인들이 만족스럽게 사용할 수 있어야 하므로, 임상 평가를 통하여 실 사용자인 장애인들이 사용함에 있어서 가장 편하

Table 1 The 12 predefined tasks

Distance between user and robot hand	Task No.	Task Name
Near	1	Serving a meal
	2	Serving a beverage
	3	Wiping and scratching face
	4	Shaving
Far	5	Picking up objects
	6	Turning switches on/off
	7	Opening/closing doors
	8	Making tea
	9	Pulling a drawer
	10	Playing games
	11	Changing CD/tapes
	12	Removing papers from printer/fax

게 느끼는 컴플라이언스 크기를 구하는 것이 다른 하나의 목표이다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 12가지 보조 작업 중에서 장애인과와의 접촉이 있는 작업의 특징과 케이블 메커니즘의 기계적인 장점을 설명한다. 3장에서는 접촉 힘 추정이 가능한 컴플라이언스 제어 알고리즘을 제안하고 설명한다. 4장에서는 제안한 알고리즘을 실험을 통하여 검증한 결과를 보이고, 임상평가를 통해서 얻어진 장애인들이 선호하는 컴플라이언스 크기를 제시한다. 마지막으로 5장에서는 결론을 맺는다.

## 2. 재활 로봇 시스템 KARES II

본 절에서는 TOD에 의해 결정된 KARES II의 12가지 보조 작업 중에서 컴플라이언스가 필요한 작업들에 대해 설명하고, 케이블 메커니즘의 기계적인 특징을 소개한다.

### 2.1 컴플라이언스가 요구되는 보조 작업

12가지 보조 작업은 Table 1과 같이 선정되었다. 그 중 3,4번 작업은 장애인과와의 접촉이 이루어지는 작업으로서 컴플라이언스 제어가 꼭 필요한 작업들이다. 면도 작업과 얼굴 닦기(굽기) 작업의 경우 모두 원하는 도구를 장애인의 얼굴 근처로 가져가면 장애인이 목을 움직여서 원하는 부위의 면도나 얼굴 닦기를 할 수 있다는 가정을 도입하였다.

이들 작업은 다음과 같은 세 가지의 공통된 특징을 가지고 있다.

1. 대부분이 기본적으로 정적인(static) 자세에서 장애인과 접촉한다.

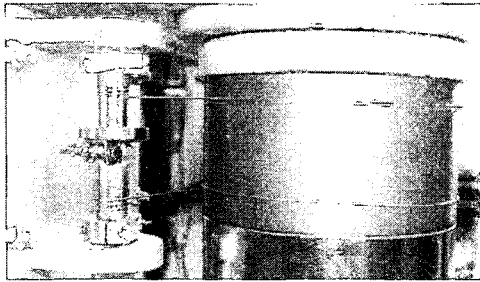


Fig. 1 Cable mechanism of KARES II

- 2. 장애인과의 접촉은 로봇 말단장치 (end-effector) 뿐만 아니라 로봇 팔의 어느 부분에서도 일어날 수 있다.
- 3. 미리 정의된 작업들로서 정의된 궤적을 따라서 움직이는 반복 작업이다.<sup>1</sup>

첫 번째 특징은 장애인들이 몸을 마음대로 가눌 수 없기 때문에 면도나 얼굴 닦기 작업을 할 때 얼굴 근처에 로봇이 멈추어야만 원활하게 수행될 수 있다는 것을 뜻한다. 두 번째의 경우는 대상으로 하고 있는 장애인들이 대부분 목 아래 부분은 마음대로 움직일 수 없는 심한 장애를 가지고 있기 때문에 생기는 특징이다. 즉, 작업을 수행하는 측면에서는 직교 공간(Cartesian space)에서 말단장치의 컴플라이언스만이 요구되지만, 장애인이라는 특성 때문에 만약의 사태에 대비하여, 장애인이 어느 부분을 누르더라도 컴플라이언스가 보장되어야 한다. 세 번째는 TOD에 의해 설계된 로봇의 특징으로서, 로봇이 설계되기 이전에 로봇이 지나야 할 경로 점들이 미리 정의되어 있어서 가능한 특징이다.

2.2 케이블 구동 메커니즘의 기계적인 장점

KARES II에 적용된 케이블을 사용한 동력 전달 메커니즘(Fig. 1)은 케이블이 감겨 있는 두 축 사이의 직경의 비를 이용하여 감속을 시키는 메커니즘으로, 일반적인 기어 사용 로봇에 비하여 높은 역구동성, 제로 백 래쉬 (zero backlash), 작은 마찰력을 가지는 것으로 알려져 있다.<sup>16)</sup>

2.2.1 높은 역 구동성

역 구동성은 동력 전달 체계의 기계적인 특성 중의 하나이다. 로봇이 역 구동 가능하다는 것은 링크에서 힘을 가하였을 때, 로봇을 쉽게 움직일 수 있다는 뜻이다. 일반적으로 로봇이 얼마나 역 구동이 가능한가의 정도는 로봇을 움직이게 하는데

Table 2 Minimum back-drivable torque and velocity reduction ratio<sup>2</sup>

Axis	Minimum back-drivable torque(Nm)	Velocity reduction ratio
1	0.4	8.5 : 1
2	0.4	13.4 : 1
3	0.5	80 : 1

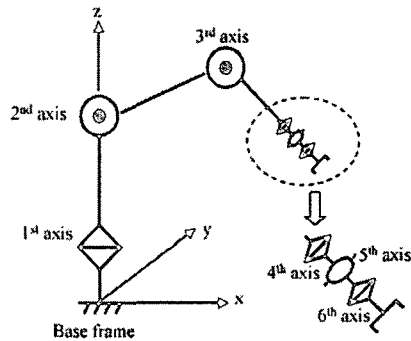


Fig. 2 Kinematic structure of KARES II

필요한 힘(관성력, 마찰력 등)의 크기에 의해서 결정된다.<sup>20)</sup> 따라서 최소 역 구동 토크 이상의 외력이 가해지는 것에 대해서는 로봇의 제어 입력이 민감하게 반응할 수 있다. Table 2는 1, 2, 3 축에 대해 각각 구현된 최소 역 구동 토크 및 감속 비이다. Table 2의 결과와 같이 KARES II는 케이블 구동 메커니즘을 사용하여 높은 역 구동성을 구현하였음을 알 수 있다.

2.2.2 제로 백 래쉬

백 래쉬란 동력 전달 장치상에 기어가 존재하여서 생기는 현상으로서 기어 이(teeth)의 불완전한 맞물림에 의하여 구동기의 움직임이 제대로 전달되지 않는 현상이다. 따라서 기어를 사용하지 않는 KARES II의 경우에는 백 래쉬 문제로 인하여 구동기의 동력이 제대로 전달되지 않는 일이 없기 때문에 좀 더 나은 성능을 보장 할 수 있다.

2.2.3 작은 마찰력

높은 감속 비를 사용하는 산업용 로봇에 있어서는 마찰력이 로봇을 구동하는데 필요한 전체 토크의 20~40% 정도까지 차지한다는 것은 잘 알려진 사실이다. 이에 비해서 케이블 구동 메커니즘을 사용한 KARES II의 경우에는 다른 로봇에 비해 상당히 작은 마찰만이 존재한다. 2, 3축의 경우에는 전체 구동력이 아닌 중력 보상을 하기 위한 토크의 10% 정도의 마찰력만이 작용한다.<sup>17)</sup> 즉 일반적인 산업용 로봇과 비교하면 상당히 작은 마찰이 작용함을 알 수 있다.

<sup>1</sup> TOD에 의해 로봇의 설계 단계에서 이미 경로 점(via-points)들은 정의되어 있다.

<sup>2</sup> KARES II는 6 자유도 PUMA 타입의 기구학적 구조를 가지고 있으며, Fig. 2와 같이 로봇 기저 쪽에서부터 순서대로 1, 2, ..., 6 축으로 정의되었다.

### 3. 접촉 힘 추정이 가능한 능동 컴플라이언스 제어

이 장에서는 본 논문에서 제안하는 컴플라이언스 제어 전략을 설명한다. 또한 제안한 컴플라이언스 제어 전략을 실제 재활 로봇에 적용하기 위해 새로 개발된 제어 알고리즘을 소개한다.

#### 3.1 제어 전략

재활 로봇 KARES II의 경우에 다음과 같은 제어 전략을 컴플라이언스 제어에 사용한다.(Fig. 3) 로봇 팔이 사용자와의 접촉 예상 구간에 들어가게 되면 일단 정지를 한 후 그 상태를 유지하는데 필요한 정적인 토크를 계산한다. 계산된 정적인 토크와 현재 제어 입력과의 차이로부터 접촉 힘을 구하고, 이를 사용하여 컴플라이언스 제어를 수행한다. 작업이 완료되는 시점에서 다음 작업을 수행한다.

이는 2장에서 이미 언급되었던 접촉 작업의 특징분석에 기반하여 제안되었다. KARES II에 적용되는 컴플라이언스 제어는 반복적인 작업에 대해서 행해지므로 언제 장애인과 접촉을 하게 되는지 미리 알 수 있는 경우가 대부분이다. 따라서 이와 같은 특징들로 인하여, 장애인과 접촉이 없는 동안은 위치제어를, 장애인과 접촉이 일어난다고 정의된 시점부터는 컴플라이언스 제어를 하는 것이 가능하다. 그리고 장애인의 접촉이 일어나는 상황이 대부분 정적인 상황이기 때문에, 기존의 접촉 힘 추정 연구들과 달리 정적인 상태를 유지하는 데 필요한 토크만을 계산해 낼 수 있으면 외부에서 걸리는 접촉 힘의 크기를 추정해 낼 수 있다. 이에 관해서는 3.2.2항에서 자세히 다루기로 한다. 또한 장애인과 로봇 팔과의 접촉은 팔 어느 부분에서도 일어날 수 있으므로, 관절 공간(joint space)에서의 컴플라이언스 제어를 하는 것이 타당하다.

이 절에서 제안한 컴플라이언스 제어 알고리즘은 보조 작업들의 특성을 잘 분석하여서, 기존의

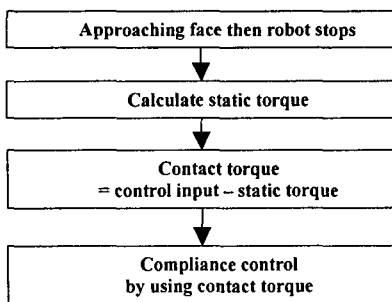


Fig. 3 Control strategy

연구들이 접촉 힘의 추정을 위해서 모든 로봇 역동역학 계산을 필요로 했던 것에 비해 적은 계산량으로 원하는 성능을 낼 수 있도록 논리적으로 구성되었다.

#### 3.2 시간 지연을 이용한 제어에 기반한 접촉 힘 추정이 가능한 능동 컴플라이언스 제어

이 절에서는 본 연구에서 기반으로 하고 있는 시간 지연을 이용한 제어에 관하여 간단히 설명한다. 그리고 KARES II에 적용하기 위해 새로 제안된 외력 추정 방법과 시간 지연을 이용한 제어에 기반한 컴플라이언스 제어에 대해서 설명한다.

##### 3.2.1 시간 지연을 이용한 제어

시간 지연을 이용한 제어는 10여 년 전부터 연구가 되어온 강인한 제어 기법으로서 간단한 구조와 탁월한 성능이 많은 연구를 통하여 입증되어 있는 제어기이다.<sup>(17-19)</sup> 본 항에서는 로봇 매니플레이터(manipulator)에 대한 TDC에 관해서 설명한다. 일반적인  $n$ 자유도 로봇 매니플레이터의 동역학은 다음 식과 같이 표현된다.

$$\tau = M(\theta)\ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + d(t) + \tau_{ext}(t) \quad (1)$$

여기서  $\theta \in \mathcal{R}^n$ ,  $\tau \in \mathcal{R}^n$ ,  $\tau_{ext} \in \mathcal{R}^n$ 는 각각 관절 변수, 관절에 가해지는 토크 그리고 환경과의 접촉 힘의 벡터이다.  $M(\theta) \in \mathcal{R}^{n \times n}$ 는 관성 행렬(inertia matrix),  $V(\theta, \dot{\theta}) \in \mathcal{R}^n$ 는 코리올리(Coriolis)력과 원심력 벡터  $G(\theta) \in \mathcal{R}^n$ 는 중력 벡터,  $d(t) \in \mathcal{R}^n$ 는 외란과 같이 모델링 되지 않은 힘을 나타낸다.

만약 우리가 로봇 매니플레이터의 모든 동역학적인 양을 정확히 추정할 수 있다면 구동력 계산법(computed torque) 제어 방식으로 제어를 할 수 있다. 그러나 로봇 매니플레이터의 동역학을 정확히 안다는 것은 상당히 어려운 일이다. 또한 외란이 존재할 경우에는 더더욱 불가능하다. 이들 불확실한 동역학과 외란을 추정해 내는 방법이 시간 지연 추정이다.

비선형 벡터  $H(t) \in \mathcal{R}^n$ 를 다음과 같이 정의하면

$$H(t) = (M(\theta(t)) - \bar{M})\ddot{\theta}(t) + V(\theta(t), \dot{\theta}(t)) + G(\theta(t)) + d(t) + \tau_{ext}(t) \quad (2)$$

식 (2)는 다음과 같이 바꿔 표현될 수 있다. 여기서  $\bar{M} \in \mathcal{R}^{n \times n}$ 는 상수 행렬로 관성 행렬의 추정값이다.

$$\tau(t) = \bar{M}\ddot{\theta}(t) + H(t) \quad (3)$$

이제 우리가 추정해 내야 되는 양은 로봇 매니플레이터의 모든 비선형 항들과 외력 항들을 포함한  $H(t)$ 가 되었다.

비선형 벡터  $\mathbb{H}$ 의 추정 값  $\hat{\mathbb{H}}$ 을 구하기 위하여 TDC는 TDE를 사용한다. 만일 시간 지연  $L$ 이 충분히 작다면, (3)으로부터 다음과 같은 근사식이 성립한다.

$$\begin{aligned} \mathbb{H}(t) &\cong \hat{\mathbb{H}}(t) \\ &= \mathbb{H}(t-L) = \tau(t-L) - \bar{\mathbf{M}}\ddot{\theta}(t-L) \end{aligned} \quad (4)$$

이를 바탕으로 구동력 계산법 제어 방법의 관점에 따라 TDC를 구성하면 식 (5)와 같이 구성된다.<sup>(16-18)</sup>

$$\begin{aligned} \tau(t) &= \bar{\mathbf{M}}(\ddot{\theta}_d(t) + \mathbf{K}_D\dot{e}(t) + \mathbf{K}_P e(t)) \\ &\quad + \tau(t-L) - \bar{\mathbf{M}}\ddot{\theta}(t-L) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서  $\theta_d \in \mathcal{R}^n$ ,  $e \in \mathcal{R}^n$ 은 각각 원하는 위치 벡터,  $e = \theta_d - \theta$ 로 정의되는 위치 오차 벡터이며,  $\dot{e}$ 은 위치오차의 시간에 대한 미분 값으로 속도 오차를 나타낸다.  $\mathbf{K}_D \in \mathcal{R}^{n \times n}$ ,  $\mathbf{K}_P \in \mathcal{R}^{n \times n}$ 는 각각 위치 오차와 속도 오차의 이득(gain)값의 대각상수행렬(diagonal constant matrix)이다.

$\mathbb{H}$ 와  $\hat{\mathbb{H}}$ 의 추정 값  $\hat{\mathbb{H}}$ 사이의  $\hat{\mathbb{H}} = \mathbb{H}$ 가 성립한다면, 폐 루프(closed loop)의 오차 동역학(error dynamics)은 식 (6)과 같이 된다.

$$\ddot{e} + \mathbf{K}_D\dot{e} + \mathbf{K}_P e = 0 \quad (6)$$

만약  $\bar{\mathbf{M}}$ 를 대각상수행렬로 선정한다면, TDC는 PD(Proportional Derivative)계인과 대각상수행렬  $\bar{\mathbf{M}}$ 만을 사용하는 독립된 조인트 제어기로서 쉽게 구현될 수 있다.

### 3.2.2 힘 센서를 사용하지 않는 접촉 힘 추정

3.2.1항에서 살펴 보았듯이 TDE를 이용하게 되면 로봇의 비선형 동역학 및 환경과의 접촉 힘이 합쳐진  $\mathbb{H}$ 를 추정해 낼 수 있다. 이로부터 접촉 힘을 추정해 내기 위해서는 로봇의 역 동역학을 알아서 TDC의 제어 입력과의 차이를 구하는 것이 필요하다.

일반적으로 6자유도 로봇의 동역학을 모두 정확히 알아낸다는 것은 쉽지 않은 일이다. 그러나 3.1절에서 언급되었듯이 정적인 상황에서의 컴플라이언스 제어가 이루어지는 것만으로도 미리 정의된 작업을 수행할 수 있기 때문에, 식 (7)과 같이, 제어 입력 중에서 중력 보상 토크 및 마찰력 보상 토크만을 계산하여 뺀 부분이 접촉 힘이 되므로 접촉 힘을 쉽게 추정 할 수 있다.<sup>3</sup>

$$\tau_{ext} = \tau - [\mathbf{G}(\theta) + \mathbf{F}(\theta, \dot{\theta})] \quad (7)$$

$\tau \in \mathcal{R}^n$ ,  $\tau_{ext} \in \mathcal{R}^n$ ,  $\mathbf{G}(\theta) \in \mathcal{R}^n$ ,  $\mathbf{F}(\theta, \dot{\theta}) \in \mathcal{R}^n$ 는 각각 제어 입력, 외부와의 접촉 힘, 중력 그리고 마찰력 벡터를 나타낸다.  $\mathbf{G}(\theta)$ ,  $\mathbf{F}(\theta, \dot{\theta})$ 는 시스템 규명(system identification)을 통하여 구하는 값이다.<sup>4(7,22)</sup>

### 3.2.3 TDC에 기반한 능동 컴플라이언스 제어

앞서 살펴본 바와 같이 TDC는 위치 제어를 위하여 제안되었으며, TDE라는 우수한 비선형 동역학 추정을 사용하여 간단하면서도 우수한 추정 성능을 보인다. 그러나 앞서 설명한 경우는 로봇의 위치 제어를 위해서 제안된 경우이며, 이를 그대로 접촉 작업에 사용할 수는 없음을 알 수 있다.

Fig. 4와 같이 로봇이 환경과 접촉하는 경우를 고찰해 보면, 로봇이 추종해야 될 위치가  $x_d$ 라 할 때, 위치 제어만을 수행한다면 오차 동역학은 식 (6)과 같이 구성되므로 로봇은 환경에 과도한 힘을 가하더라도 오차를 0으로 만들기 위해  $x_d$ 에 도달하려 할 것이다. 그러나 식 (5)에 외부에서 가해지는 토크 값을 피드백(feedback) 하는 항을 추가하여 식 (8)을 사용하게 되면,

$$\begin{aligned} \tau(t) &= \bar{\mathbf{M}}(\ddot{\theta}_d(t) + \mathbf{K}_D\dot{e}(t) + \mathbf{K}_P e(t) - \mathbf{K}_r \tau_{ext}(t)) \\ &\quad + \tau(t-L) - \bar{\mathbf{M}}\ddot{\theta}(t-L) \end{aligned} \quad (8)$$

다음과 같은 오차 동역학을 가지게 된다. 여기서  $\mathbf{K}_r \in \mathcal{R}^{n \times n}$ 는 접촉 힘의 이득 값으로 대각 상수 행렬로 선정한다.

$$\ddot{e} + \mathbf{K}_D\dot{e} + \mathbf{K}_P e - \mathbf{K}_r \tau_{ext} = 0 \quad (9)$$

즉, 접촉 힘  $\tau_{ext}$ 와 위치 오차  $e$ 사이의 (10)과 같은 컴플라이언스가 구현되어서 환경에 과도한 힘을 가하지 않으면서 어느 정도의 위치 오차가 존재하여 추종해야 할  $x_d$ 가 아니라  $x$ 에 도달하게 된다.

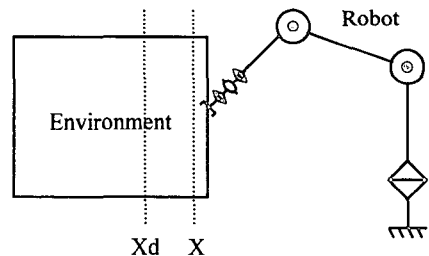


Fig. 4 Diagram of contact bet. robot and environment

<sup>3</sup> KARES II는 케이블 구동 메커니즘을 사용하여 작은 점성 마찰과 쿨롱 마찰만이 존재하므로 다른 로봇에 비해 추정하기 쉽다.

<sup>4</sup> 본 연구의 경우에는 최소 자승법을 이용하여 중력과 마찰력 항을 규명하였음.

$$\frac{e_i}{\tau_{ex\_i}} = \frac{k_{f\_i}}{s^2 + k_{d\_i}s + k_{p\_i}} \quad (10)$$

여기서 하첨자  $i$ 는  $i$ 번째 관절에 관한 변수임을 의미한다. 정상 상태(steady-state)에 도달하게 되면 속도 오차와 가속도 오차는 0으로 수렴하게 될 것이고 오차 동역학은 식 (11)과 같은 용수철과 비슷한 거동을 보이게 된다.

$$\frac{e_i}{\tau_{ex\_i}} = \frac{k_{f\_i}}{k_{p\_i}} \quad (11)$$

3.2.4 제어 입력과 접촉 힘 추정의 시간에 대한 인과 관계 분석

본 논문에서 제안하는 접촉 힘 추정 방법과 제어 방법을 같이 사용하려고 하면 식 (7)과 (8)이 동시에 수행되어야 하는 모순이 발생하게 된다. 따라서 접촉 힘 추정에 관하여 좀더 명확한 시간에 따른 인과 관계(time precedence)의 분석이 필요하다. 이를 위해서, 우선 Fig. 5와 같은 샘플링 타임에 따른 제어 입력 계산 과정을 살펴보기로 하자.

이 분석을 하기 위해서는 샘플링 타임이  $L$ 이라 할 때, 시각  $t$ 에서의 제어 입력이  $\tau_1$ 인가  $\tau_2$ 인가를 명확히 할 필요가 있다. 이에 보다 명확한 분석을 위하여 시각  $t$ 직전까지 유지되는 제어 입력을  $\tau(t-0)$ 와 같이 표기하고, 마찬가지로 시각  $t$  직후부터 다음 샘플링 타임까지 유지되는 제어 입력을  $\tau(t+0)$ 와 같이 표기하기로 한다. 이와 같이 표기를 정하면 식 (12)와 같은 등식이 성립한다.

$$\begin{aligned} \tau(t-L+0) &= \tau(t-0) \\ \tau(t+L-0) &= \tau(t+0) \end{aligned} \quad (12)$$

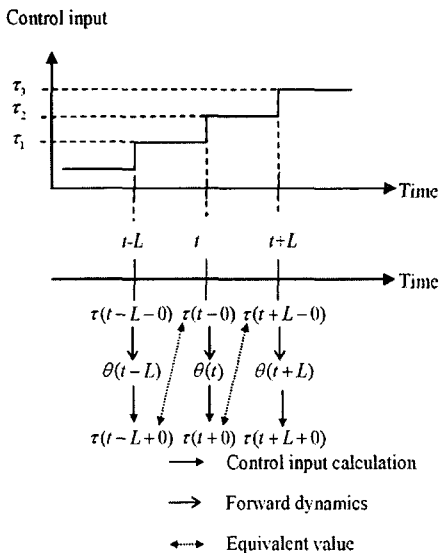


Fig. 5 Time precedence of control input calculation

이제 실제로 각 샘플링 타임마다 제어가 되는 과정에 대해서 살펴보면 시각  $t-L$ 직전까지는 그 전 샘플링 타임에 계산된 제어 입력인  $\tau(t-L-0)$ 에 의하여 로봇이 움직여진다. 시각  $t-L$ 에서는 관절의 각도  $\theta(t-L)$ 을 읽은 후, 제어 입력  $\tau(t-L+0)$ 을 계산하여 내보내 준다. 시각  $t$ 직전까지는 이 제어 입력,  $\tau(t-0)$ 이 유지되며 시각  $t$ 에서는 그 직전 샘플링 타임에서와 마찬가지로 제어 입력 계산을 위해  $\theta(t)$ 를 읽고, 이로부터 제어 입력인  $\tau(t+0)$ 을 지령하게 된다. 이와 같은 과정이 제어하는 과정 내내 반복하여 이루어지게 된다. 이제 각 샘플링 타임에서 어떻게 제어가 이루어지는가에 대하여 밝혀졌으므로, 표기의 간편성을 위하여 시각  $t$ 에서의 제어 입력인  $\tau(t)$ 는 (13)과 같이 각 샘플링 타임에서 새로이 계산되는 값,  $\tau(t+0)$ 로 정의한다. 이렇게 정의를 하면  $t=0$ 에서 제어 입력을 정의하는 데 문제가 없다.

$$\tau(t) \equiv \tau(t+0) \quad (13)$$

그렇다면 이제 어떤 시각  $t$ 에서 접촉 힘의 정보는 어디에서 구하는 것이 타당한가에 대한 분석을 할 수가 있다. 시각  $t$ 에서의 접촉 힘의 정보라는 것은 시각  $t$ 가 되기 바로 전에 외부에서 걸린 접촉 힘에 대한 정보, 즉  $\tau(t)$ 를 계산하기 전까지 외부에서 걸린 접촉 힘에 대한 정보를 말한다. 그런데  $\tau(t)$ 는 그 시각 이후에 앞으로 로봇을 어떻게 움직일 것인가에 대한 정보만을 가지고 있으므로, 그 시간에서의 접촉 힘의 정보를 얻어내는데 사용하는 것은 적합하지 않다. 따라서 시각  $t$ 이전의 접촉 힘과 정적인 상태를 유지하는 데 필요한 힘에 관한 정보가 가장 잘 담겨 있는  $\tau(t-L)$ 을 사용하는 것이 타당하다. 그렇다면  $\tau(t-L)$ 에서 어느 시간의 정적인 상태를 유지하는데 필요한 힘을 계산하여 빼는 것이 옳은가에 대한 분석이 필요하다. 시각  $t$ 바로 직전의 접촉 힘에 대한 정보를 제어 입력  $\tau(t-L)$ 이 가지고 있으므로, 이 때 빼주어야 하는 정적인 힘도 시간  $t-L$ 에서의 값  $G(\theta(t-L))$ 를 사용하는 것이 타당하다. 만약  $G(\theta(t))$ 를 사용한다면 이는 이미  $\tau(t-L)$ 에 의해서 영향을 받은 관절 각도인  $\theta(t)$ 를 사용하는 것이므로 시간에 관한 인과 관계를 만족시키지 못한다. 따라서, 실제로 접촉 힘 추정방법을 적용할 때에는 (14)와 같은 방식으로 하여 적용하는 것이 타당하다.

$$\tau_{ext}(t) \equiv \tau(t-L) - G(\theta(t-L)) \quad (14)$$

만약 샘플링 타임  $L$ 이 점점 작아져서 0에 근접

한다면 (14)는 근사식이 아니라 등식으로서 성립하게 된다.

#### 4. 검증 및 임상 평가

이 장에서는 3장에서 제안된 컴플라이언스 제어 알고리즘의 검증 실험과 장애인들이 선호하는 컴플라이언스의 크기를 알아보기 위해 행해진 임상 평가 결과에 대하여 설명한다.

##### 4.1 제안된 알고리즘의 검증 실험

이 절에서는 KARES II에 실제로 제안한 알고리즘을 적용한 결과를 기술한다.

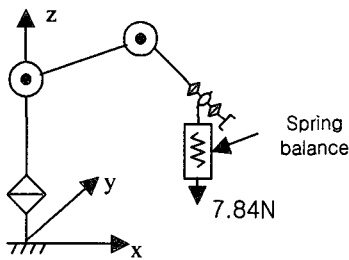


Fig. 6 Schematic diagram of experimental setup

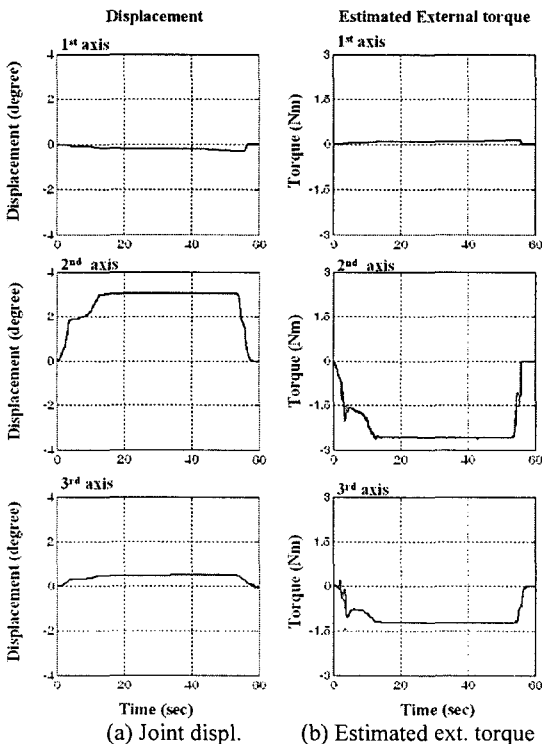


Fig. 7 Experimental results of compliance control

첫 번째로 면도 작업의 경우에 대해서 장애인 얼굴 근처에 도달한 상황에서 실험을 수행하였다. 일정한 접촉력을 유지하기 위해서 7.84N 정도의 힘을 Fig. 6과 같이 용수철 저울을 사용하여 -Z 방향으로 가하는 실험을 수행하였다. 실험 결과 Fig. 7과 같이 컴플라이언스 제어가 잘 수행됨을 확인 할 수 있다. Fig. 7(a)는 가해진 외력에 대하여 로봇의 변위를 나타내고 있으며, Fig. 7(b)는 제안한 접촉 힘 추정 방법으로 추정된 접촉 힘을 나타내고 있다. Table 3에 나와 있는 것과 같이, 실제 값과 제안 한 접촉 힘 추정방법으로 추정된 접촉 토크 값이 거의 일치함을 확인 할 수 있다. 또한 Table 4와 같이 원하는 컴플라이언스가 잘 구현되었음을 확인 할 수 있다.

두 번째 실험은 장애인을 대상으로 한 임상 평가에서 이루어졌다. 이때 컴플라이언스는 Table 6의 레벨 2의 값으로 주어졌다. 이때 실제로 컴플라이언스가 얼마나 잘 구현되었는가를 가장 쉽게 알아 볼 수 있는 방법은 각 축의 위치 오차와 접촉 힘 사이에 식 (10)과 같은 전달 함수가 얼마나 잘 만족되는지를 주파수 영역에서 분석해 보는 것이다. 위치 오차와 추정된 접촉 힘 사이의 전달 함수는 고속 푸리에 변환(FFT)을 이용하여 Fig. 8과 같이 구하여졌다. 위에서부터 차례대로 1,2,3축의 결과이며, 실선은 구현하고자 했던 컴플라이언스를, 점선은 실험 결과 실제로 구해진 컴플라이언스를 나타낸다. 결과에서 알 수 있듯이, 실제 값과 일치하는 컴플라이언스를 구현하지는 못하였으나, 의도한 값에 근접하게는 구현이 되었음을 알 수 있다. 즉, 본 논문에서 제안하는 접촉 힘 추정 방법과 컴플라이언스 제어가 실제 상황에서도 잘 동작함을 보여주는 것이다.

##### 4.2 임상 평가

KARES II 는 12 가지 보조 작업을 목표로 하고 있으므로, 실제적인 도움이 되기 위해서는 각 작업 별로 사용자들이 가장 선호하는 컴플라이언스

Table 3 Estimated external torque

Axis	Real value(Nm)	Estimated value(Nm)
1	0	0.01
2	-2.4	-2.45
3	-1.2	-1.2

Table 4 Realized compliance [deg/Nm]

Axis	Desired value	Experimental value
1	2.21	2.21
2	1.17	1.17
3	0.39	0.39

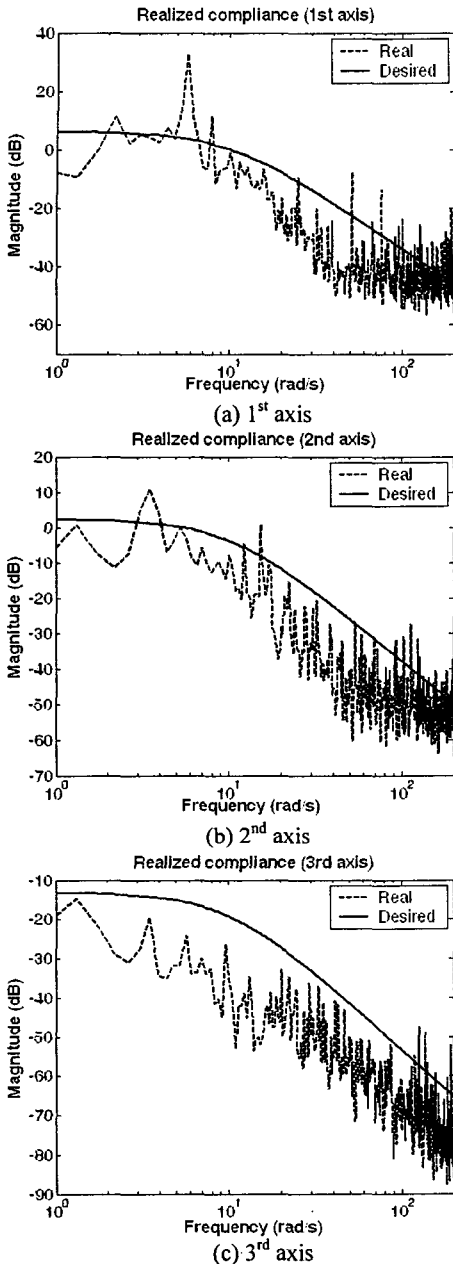


Fig. 8 Compliance realization

값을 알아야 할 필요가 있다. 이를 위해서 서울 국립 재활원(National Rehabilitation Center)에서 6명의 경추 손상환자를 대상으로 면도 작업 및 얼굴 닦기 작업에 대한 임상 평가가 이루어졌다. 6명의 피험자는 모두 국립 재활원에서 각자에 적합한 재활 치료를 받고 있는 사람들이다(Table 6).<sup>(22)</sup>

임상 평가는 KARES II를 사용하여 피험자들이 면도 작업과 얼굴 닦기 작업을 미리 준비한 3가지 레벨의 컴플라이언스 각각에 대하여 수행하여 본

Table 5 Three levels of compliance [deg/Nm]

축	레벨 1	레벨 2	레벨 3
1	1.232	2.053	4.107
2	0.782	1.303	2.610
3	0.131	0.218	0.436

후 설문에 응답하는 방식으로 진행되었다.

설문은 크게 두 문항이었다. 첫 번째 문항은 작업을 잘 할 수 있는가에 상관없이 어느 경우에 가장 안전하다고 느껴지는가를 고르는 것이었다. 두 번째 문항은 안전하다고 느껴지는 것과는 상관없이 어느 경우에 가장 편안하게 면도나 얼굴 닦기를 할 수 있었는가를 묻는 문항이었다. 이 두 문항은 서로 중복되는 내용을 묻고 있는 것처럼 보일 수 있으나, 안전이라는 항목과 작업의 편한 정도를 묻는 질문에 항상 다른 항목에 대한 고려를 배제하고 답을 하도록 함으로서 두 문항이 서로 독립적으로 의미를 가질 수 있도록 하였다.

실험에 주어진 컴플라이언스의 크기는 두 작업 모두에 대하여, Table 5와 같이 세가지 레벨로 주어졌다. 컴플라이언스는 로봇 팔의 1, 2, 3축에 구현되었으며, 링크의 길이를 고려하여 각 축의 컴플라이언스를 주었다.<sup>5</sup>

Table 5에서 레벨 1이 컴플라이언스가 가장 작은 경우, 즉 강성이 가장 큰 경우이며, 레벨 3이 컴플라이언스가 가장 큰 경우 즉, 강성이 가장 작은 경우이다. 세가지 레벨은 조사된 사람 팔의 컴플라이언스 값<sup>(21)</sup>을 기초로, 첫 번째 것은 사람 팔의 컴플라이언스보다 작은 값, 두 번째 것은 사람 팔의 컴플라이언스와 거의 비슷한 값, 세 번째 것은 더 큰 값으로 정하였다.

먼저 면도 작업(Fig. 9(a))의 경우, 3가지 레벨에 대해 실험하였을 때, 장애인의 선호도는 Fig. 9와 같이 분포되었다. Fig. 10(a)는 면도작업 시에 장애인이 각각의 레벨에 대해 안전하다고 느끼는 정도를 보여주며, Fig. 10(b)는 같은 작업 시에 각각의 레벨에 대해 작업의 만족도를 보여준다.

결과에서 볼 수 있듯이, 레벨 2와 3에서 안전성 작업의 편한 느낌에 대한 만족도가 높은 것으로 조사되었다. 이는 피험자들이 면도작업을 할 때는 간병인의 팔처럼 컴플라이언스가 구현되는 것이 더 안전하고 편리하며, 그 값이 큰 값(강성이 작은 값)에서 만족도가 높다는 것을 보여 준다.<sup>(21)</sup> 얼굴 닦기(꺠기) 작업(Fig. 9(b))의 경우는 위의 세

<sup>5</sup> 손목 축(4,5,6축)에서는 말단장치의 방위를 결정하므로, 직교 좌표계의 위치좌표 x, y, z축에 대한 컴플라이언스는 1,2,3축만으로 주어질 수 있다.



Table 6 Information for subjects

Subject ID	Sex	Age	Lesion level	Residual motor ability			Technical aids
				Head & Neck	Shoulder	Arms	
A	M	33	C4	○	△	X	None
B	M	36	C5	○	○	X	None
C	M	35	C4	○	△	X	None
D	M	51	C5	○	○	○	Powered wheelchair
E	M	21	C4	○	△	X	None
F	M	31	C5	○	○	△	Powered wheelchair



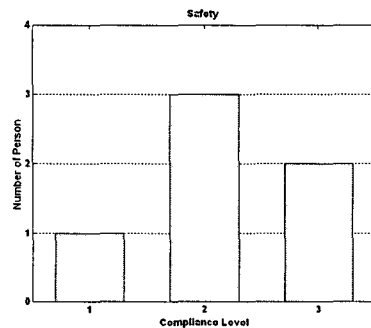
(a) Shaving task



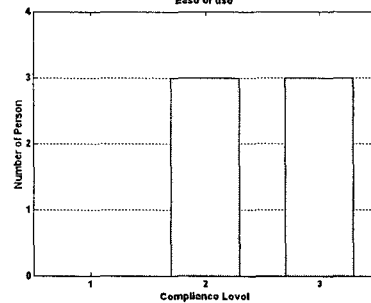
(b) Wiping and scratching task

Fig. 9 Clinical evaluation at NRC

가지 레벨에 대해 모두 만족도가 나쁜 것으로 나타났으며, Table 5의 컴플라이언스보다 훨씬 작은 값, 즉 매우 강성이 큰 경우에 만족스럽게 느끼는 것을 알 수 있었다. 이는, 작업의 특성상 로봇이 컴플라이언트(compliant)하여 얼굴과 접촉 시 밀려 나게 되면 얼굴 닦기가 어렵기 때문이다. 따라서 얼굴 닦기(긁기) 작업의 경우는 면도 작업과 같이 컴플라이언스를 주기 보다는 강성을 크게 하여 버텨주어야 만족된 작업이 이루어지며, 컴플라이언스 제어를 구현해 주는 것보다 로봇이 수건을 윈



(a) Safety



(b) Ease of use

Fig. 10 Evaluation of shaving task by the subjects

하는 위치에 단단하게 고정시켜 주고 사용자가 자신의 얼굴을 움직여서 얼굴을 닦는 것이 더 바람직하다는 것을 보여준다.

### 5. 결론

본 논문에서는 재활 로봇의 개발에 있어서 컴플라이언스 제어가 꼭 필요함을 제기하였다. 컴플라이언스 제어를 구현함에 있어서, 로봇의 가격을 높이지 않기 위해 별도의 힘 센서 없이도 접촉 힘

을 추정할 수 있어야 했다. 그리고 실제적으로 장애인들에게 도움이 되기 위해서는 적절한 컴플라이언스 크기의 선정 또한 필요했다.

따라서 미리 정의된 작업들에 대한 분석을 바탕으로, 시간 지연을 이용한 제어에 기반한 접촉 힘 추정이 가능한 능동 컴플라이언스 제어 알고리즘이 제안되었다. 이 알고리즘은 실험을 통해서 그 유용성이 검증되었다. 그리고 국립 재활원에서 면도 작업 및 얼굴 닦기 작업에 대한 임상 평가를 통하여 장애인들이 선호하는 컴플라이언스를 구하였다. 이 임상 실험 결과는 실제 장애인들의 선호도를 반영했다는 점에서 중요한 의미를 가지며, 앞으로 재활 로봇을 개발할 때 유용한 지침이 될 수 있을 것이다.

## 후 기

본 연구는 정보통신부 대학 IT연구센터 육성지원사업의 연구결과로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- (1) Service Robot Technical Development Team, 2000, "Critical Technology 21, 1<sup>st</sup> phase report".
- (2) Chang, P. H., Park, H. S., Park, J., Jung, J. H. and Jeon, B. K., 2001, "Development of a Robotic Arm for Handicapped People : A Target-Oriented Design Approach," 7<sup>th</sup> International Conference on Rehabilitation Robotics, Integration of Assistive Technology in the Information Age, Vol. 9, pp. 84~92.
- (3) Salisbury, J. K., 1980, "Active Stiffness Control of Manipulator in Cartesian Coordinates," Proc. 19<sup>th</sup> IEEE Conf. On Decision and Contr.
- (4) Whitney, D. E., 1977(June), "Force Feedback Control of Manipulator Fine Motions" ASME J. Dyn. Sys., Meas., Contr., pp. 91~97.
- (5) Neville Hogan, 1985, "Impedance Control: An approach to manipulation, Part I II III", Trans of ASME, J. Dyn. Sys., Meas., Contr, Vol. 107, pp. 1~24.
- (6) Daniel E. Whitney, 1987, "Historical Perspective and State of the Art in Robot Force Control," The International Journal of Robotics Research, Vol. 6, No. 1, pp. 3~14.
- (7) Kang, S. H., 2002, "Active Compliance Control for the Rehabilitation Robot with Cable Transmission," Master Thesis, KAIST, Dept. of Mechanical Engineering.
- (8) Chang, P. H., Kang, S. H., Park, H. S., Kim, S. T. and Kim, J. H., 2003, "Active Compliance Control for the Rehabilitation Robot with Cable Transmission," 8<sup>th</sup> International Conference on Rehabilitation Robotics, pp. 84~87.
- (9) Kiyoshi Ohisi, Masaru Miyazaki, Masahiro Fujita and Yasumasa Ogino, 1991, " $H^\infty$  Observer Based Force Control Without Force Sensor," in Proc. IEEE IECON'91, pp. 1049~1054.
- (10) Toshiyuki Murakami, Ryo Nakamura, Fangming Yu and Kouhei Ohnishi, 1993, "Force Sensorless Impedance Control By Disturbance Observer," in Proc. IEEE Power Conversion Conference '93, pp. 352~357.
- (11) Toshiyuki Murakami, Fangming Yu and Kouhei Ohnishi, 1993, "Torque Sensorless Control in Multidegree-of-Freedom Manipulator," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 40, No. 2, pp. 259~265.
- (12) Eom, K. S., Suh, I. H., Chung, W. K., Oh, S. -R., 1998, "Disturbance Observer Based Force Control of Robot Manipulator without Force Sensor," IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp. 3012~3017.
- (13) Song, J. I., Son, J. H., Kwon, D. S. and Kim, S. K., 1998, "Control of a CNC Machining Center Using the Indirect Measurement of the Cutting Force," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 15, No. 11, pp. 19~20.
- (14) Brian Armstrong, Oussama Khatib and Joel Burdick, 1986, "The Explicit Dynamic Model and Inertial Parameters of the PUMA 560 Arm," IEEE Int. Conference on Robotics and Automations, pp. 510~518.
- (15) Michel A. Lemay, Neville Hogan, and J. W. Arian van Dorsten, 1998, "Issues in Impedance Selection and Input Device for Multijoint Powered Orthotics," IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, Vol. 6, No. 1, pp. 102~105.
- (16) William T. Townsend, 1988, "The Effect of Transmission Design on Force-Controlled Manipulator Performance," Ph.D. Thesis, MIT.
- (17) Youcef-Toumi, K. and Osamu Ito, 1990, "A Time Delay Controller for Systems with Unknown Dynamics," Trans. of ASME, J. Dyn. Sys., Meas., Contr, Vol. 112, No. 1, pp. 133~142.
- (18) Hsia, T. C. and Gao, L. S., 1990, "Robot Manipulator Control Using Decentralized Linear Time-Invariant Time-Delayed Joint Controllers," IEEE Int. Conference on Robotics and Automations, pp. 2070~2075.
- (19) Kwon, O. S., 2001, "Stability Analysis of Time Delay Control Systems," M.S. Thesis, KAIST, Dept. of Mechanical Engineering.
- (20) <http://www.barretttechnology.com/robot/products/arm/glossary.htm>.
- (21) Hiroaki Gomi, Mitsuo Kawato, 1997, "Human Arm Stiffness and Equilibrium-Point Trajectory During Multi-Joint Movement," Biological Cybernetics, Vol. 76, pp. 163~171.
- (22) Bien, Z., Chung, M. J., Chang, P. H., Kwon, D. S., Kim, D. J., Han, J. S., Kim, J. H., Kim, D. H., Park, H. S., Kang, S. H., Lee, K. and Lim, S. C., 2004, "Integration of a Rehabilitation Robotic System(KARES II) with Human-Friendly Man-Machine Interaction Units," Autonomous Robots, Vol. 16, pp. 165~191.