

# 인간 임피던스 추정을 이용한 인간과 로봇의 협조 작업

서동수\*, 홍석규\*, 이병주\*\*, 서일홍\*\*\*

## Human-Robot Collaboration Work Via Human Impedance Estimation

Dong Soo Suh\*, Suk Kyu Hong\*, Byung Ju Yi\*\*, and Il Hong Suh\*\*\*

### ABSTRACT

This paper treats the estimation of human impedance and their application to human-robot collaboration work. Initially, we perform an experiment at which the human becomes a slave and the robot behaves like a master having F/T sensor on its end. The human impedance expressed in terms of mass, damping, and stiffness properties are estimated based on the force data measured by F/T sensor and the commanded position data of the robot. To show the effectiveness of the estimated human impedance, we perform the second experiment at which the roles of the human and the robot are reversed. It is shown that the robot using the estimated human impedance follows the trajectory commanded by human very smoothly.

**Key Words** : Impedance Control(임피던스 제어), Human Impedance(인간 임피던스), Collaboration Work(협조 제어)

### 1. 서론

기존의 로봇은 사용자가 교시한 방식에 따라 로봇의 움직임을 제어하는 방법으로 사용되어져 왔다. 이러한 방법은 그 동안 여러 산업 현장에서 매우 뛰어난 효과를 나타내었다. 그러나, 미래의 로봇은 단순한 교시 작업 뿐만 아니라 다양한 기능 및 향상된 성능이 요구되고 있다. 또한, 가정, 사무실 등에서 사용될 서비스 로봇은 우선적으로 안정성을 지녀야 하며 동시에 인간의 의도 및 제어 방식을 사용할 수 있는 인간 친화형 로봇이어야 할 것으로 판단된다.

사람과 로봇이 접촉되어서 작업을 수행하려는 시도는 이전부터 꾸준히 연구되어져 온 분야로써 Telerobot System, Human Amplifiers 와 같은 분야를

예로 들 수 있다. Telerobot System 은 사람이 조작하는 로봇이 Master 가 되고 Slave 인 로봇이 Vision Sensor, Force Sensor 등을 이용하여 알려진 또는 미지의 환경에서 장애물을 만나거나 환경과 접촉하는 경우에 로봇의 동작을 적절히 조정하는 방식이다<sup>[1, 10-12]</sup>. Human Amplifier 는 인간의 힘의 한계를 극복하기 위하여 사람의 어깨에 기계(기구)를 부착하여 사람이 내는 힘에 비례하여 힘을 증폭시키는 방식을 의미한다<sup>[2]</sup>. 이러한 방법들은 인간의 의사를 반영하여 목적지를 찾아 갈 수 있고, 능동적으로 장애물을 회피하며, 힘을 증폭시키는 장점이 있다. 그러나, 이러한 접근 방법은 진정한 의미의 로봇과 사람의 협조 작업이라고 할 수는 없다. 협조 작업의 간단한 예로는 무거운 물건을 인간과 로봇이 협동하여 들어 운반하는 경우라고

\* 한양대학교 기전공학과

\*\* 한양대학교 제어계측공학과

\*\*\* 한양대학교 전자공학과

알 수 있다. 그러나, 인간과 로봇이 무게를 나누지 않고 인간이 가야 할 방향만을 정해 주고 로봇이 물건을 나르다면 실질적인 협조 작업이라고 할 수 없을 것이다. 인간과 로봇의 협조 작업을 수행하기 위해서 해결되어야 하는 문제는 다음과 같다 : 로봇이 어떻게 사람에게 반응할 것인가 하는 문제, 어떻게 사람과 로봇이 물체의 무게를 나누어 들 것인가 하는 문제, 작업에 따라서 로봇과 인간의 역할이 어떻게 나뉘어야 하는가 하는 문제이다. 이러한 문제점은 궁극적으로는 인간과 로봇간의 상호 작용을 어떻게 제어할 것인가 하는 문제로 귀결되고 해결 방법은 로봇의 입장에서 사람을 모델링하는 방법과 사람의 입장에서 로봇을 사람처럼 자연스럽게 동작시키는 방법이 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 임피던스 제어 방법이 소개되었으며<sup>13, 4, 5, 6, 7</sup> 이것은 인간과 로봇의 상호 작용을 질량(Mass), 댐퍼(Damper), 스프링(Spring)으로 모델링 하여 제어기를 구성하는 방식이다. 인간과 로봇의 협조 작업은 기존에 로봇 자체만으로는 할 수 없었던 다양한 작업에 적용될 수 있음을 예측할 수 있다. 이를 위해서는 인간의 임피던스를 정의하고, 측정하는 방법과 로봇을 제어하는 방법이라는 기본적인 문제의 해결 방법을 찾아야 한다. 그러므로, 본 논문에서는 이러한 분야에 대한 문제 해결을 시도 하고자 한다.

인간과 로봇의 협조 제어에 관한 연구는 중요도에 비하여 그 사례가 적었다. Kosuge<sup>6</sup> 등은 1 자유도의 매니플레이터를 이용하여 환경과의 접촉에 대해 적절히 순응하는 제어 알고리즘을 제안하였다. 또한, Al-Jarrah 과 Zheng<sup>8</sup>은 인간과 로봇이 물체를 들어 올리는 협조 작업에서 사람의 임피던스 중 Stiffness 성분 K 만을 고려한 경우에 대한 실험을 수행하였다. Jong H. Park<sup>17</sup>는 임피던스 파라미터 중 Stiffness 만이 변화한다는 모델링을 통하여 Parallel-Link 매니플레이터에 적용을 하였다. 그러나, 이상의 연구는 단순히 고정된 K를 활용하거나 간사화 된 임피던스 모델을 사용하여 모델링의 정확성이 결여되어서 인간과 로봇의 협조 작업에 적용하기에는 많은 제약이 따른다. 한편 Ikeura 그리고 Inooka<sup>9</sup>는 두 인간의 협조 작업 실험을 통한 인간의 임피던스를 질량과 댐퍼로 모델링을 하여 추정된 임피던스를 로봇과 인간의 협조 작업에 적용하는 실험을 수행하였으나 임피던스 값들이 음의 영역을 지님으로 인한 안정성의 문제가 발생되

었다. 따라서, 본 논문에서는 협조 작업을 수행하기 위한 임피던스 모델을 구하는 방법을 제시하고자 한다. 추정된 인간의 임피던스 모델을 협조 작업에 적용하여 모델링의 타당성을 입증한다 실험은 2 단계로 이루어진다. 1 단계 실험에서는 로봇이 능동자(Leader)가 되고 인간이 수동자(Follower)가 되어 정해진 궤적을 로봇이 움직이고 인간이 협조 작업에 참여한다. 이때 로봇의 말단 효과장치(End-Effector)에 부착된 힘 센서(Force/Torque Sensor)를 이용하여 힘 데이터를 구하고 엔코더(Encoder)를 이용하여 로봇의 위치 데이터를 구한다. 샘플링 시간(Sampling time)으로 미분하여 속도와, 가속도 데이터를 구하여 인간의 임피던스를 모델링 한다. 1 단계에서 얻어진 임피던스 모델은 시간에 대하여 변화하는 모델이므로 이를 2 단계 실험에 적용하기 위하여 가속, 등속, 감속 구간에 대하여 변화한다는 가정하에 모델링 한다. 이러한 임피던스를 이식한 로봇이 수동자가 되고 인간이 능동자가 되어 2 단계 협조 작업을 수행한다. 이때 얻어진 힘, 위치, 속도 데이터와 1 단계에서 구한 데이터들을 비교하여 제안된 임피던스 모델의 타당성을 입증한다.

## 2. 인간의 임피던스 모델

### 2.1 일반적인 인간의 임피던스 모델

인간과 로봇의 협조 작업에서는 마치 인간과 인간이 협조하여 일하는 것과 같은 편리함과 위험성을 느끼지 않는 것이 중요하다. 따라서, 인간과 인간이 협조하여 일하는 패턴을 분석하여 사람의 제어 방식을 모델링하여 로봇을 제어하는 것이 매우 중요하다. 많은 생체학자들은 사람의 제어 방식을 임피던스의 형태로 모델링하여 왔으며 Hogan<sup>3</sup>은 이러한 개념을 하나의 로봇 제어방식으로 소개하였다. 사람이 물체를 잡고 정해진 궤적을 따라서 움직이는 경우에 힘과 물체의 궤적과의 관계는 다음과 같은 운동방정식의 형태로 주어진다.

$$F = M\ddot{x} + B\dot{x} + Kx \quad (1)$$

여기서 F는 세 방향의 선형 힘과 세 방향의 모멘트로 형성되는 6 자유도를 가진 힘 벡터를 나타내며  $x, \dot{x}, \ddot{x}$ 은 여섯 방향의 위치, 속도, 그리고 가속도 벡터를 각각 나타낸다. 그리고 M, B, K는 각각 관성, 댐핑, 그리고 강성을 나타내는 6x6 임피

근의 행렬식은 나타낸다. 인간은 작업의 특성에 알맞게 이러한 세 개의 임피던스 행렬을 매 순간 변화시켜가며 작업을 하고 있는 것이다. 여기서 각각의 임피던스 행렬은 물리적 상황에서 항상 대칭이므로 각각 21 개씩의 독립변수를 가지며 도합 63 개의 독립변수가 존재한다. 또한 일반적으로 이들 63 개의 임피던스 파라미터들은 매시간 변한다. 따라서 주어진 작업에 대하여 인간의 임피던스를 예측한다는 것은 매우 어려운 일이다. 이러한 어려움 때문에 기존의 연관된 연구에서는 가장 간단한 1 자유도 모델에 대하여 인간의 임피던스를 예측하는 실험에 국한되었다.

## 2.2 실험시 인간의 임피던스 모델

로봇과 사람이 Fig. 1 과 같이 물체를 견고하게 잡고 있다고 가정하고 로봇이 미리 계획된 경로인 X 방향을 따라서 움직이면 사람은 물체를 잡고 따라가게 된다. 이때 로봇 관절에 부착된 엔코더를 이용하여 각 관절의 위치 정보를 얻고 이를 샘플링 타임으로 미분하여 속도와 가속도 정보를 얻는다. 이러한 정보는 정 방향 기구학에 의하여 인간이 잡고 있는 지점의 위치, 속도, 가속도를 산출하게 된다. 또한 인간이 로봇과의 협조 작업에서 발생시키는 힘은 말단 효과 장치에 부착된 힘 센서를 이용하여 측정하도록 한다.

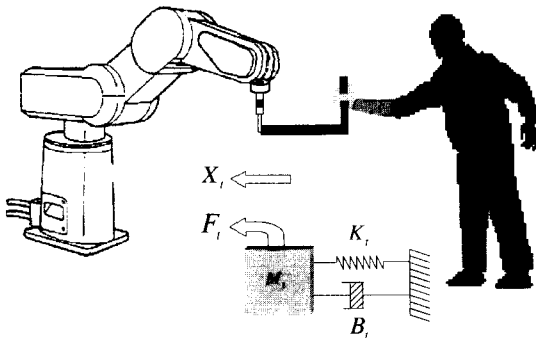


Fig. 1 human impedance model used experiment

이러한 실험을 수행하는 그림은 Fig. 1 과 같다. Fig. 1 에서  $F_t$  는 로봇의 말단 효과 장치에 부착된 힘 센서로부터 샘플링 시간 마다 측정된 힘의 값을 나타낸다. 이것은 협조 작업에 참여할 인간의 임피던스 모델을 세우는데 사용된다. 그리고,  $X_t$  는 주어진 샘플링 시간에 움직인 거리를 나타낸다. 힘 데이터와 위치, 속도, 가속도 데이터를 이용하

여 인간과 로봇간의 완충 작용을 나타내는 임피던스 파라미터를 구한다. 이때 구한  $M_t$ ,  $B_t$ ,  $K_t$  도 시간에 대해서 변화하는 값을 가진다.

## 3. 인간의 임피던스 측정

### 3.1 실험 환경 및 실험방법

실험을 수행하기 위해서 5 자유도 PT-200 로봇을 이용하였으며, 이 로봇을 제어하기 위해서 Motorola 사의 마이크로프로세서인 68030 을 CPU 보드로 이용하여 VME System 상에서 VxWorks 실시간 운영 체계를 사용하였다. Fig. 2 는 구현된 제어기의 구조를 나타낸다.

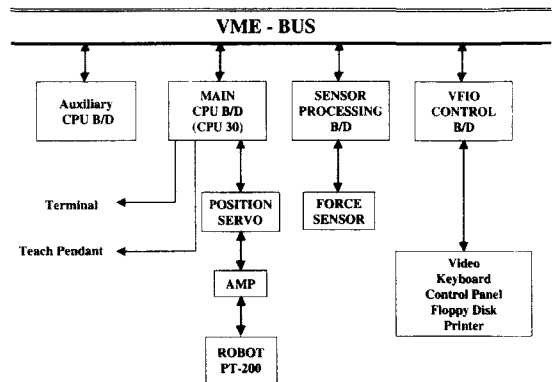


Fig. 2 Hardware Architecture

실험이 진행되는 과정은 1 단계에서 로봇이 능동자가 되고 인간이 수동자가 되는 실험을 수행한다. 이 과정에서 CPU 보드는 정해진 궤적에 따라서 주어진 샘플링 시간 안에 움직여야 하는 경로 점을 계산하여 servo 보드에 목표치를 명령한다. 보조 CPU 보드는 인간과 로봇간의 상호 작용으로 생기는 힘 데이터를 저장하는 역할을 한다. 이때 구한 힘 데이터와 위치, 속도, 가속도 데이터를 이용하여 인간의 임피던스 파라미터를 계산한다. 2 단계에서는 인간이 능동자가 되고 로봇이 수동자가 되어 인간이 로봇을 끌 때에 발생하는 힘 데이터를 보조 CPU 보드에서 구현된 임피던스 알고리즘으로 다음의 목표치를 계산하고 이를 CPU 보드에서 로봇의 기구학을 풀어 각 모터에 다음 샘플링 시간 안에 로봇이 가야 할 목표치를 계산하여 명령하고, 보조 CPU 보드에서 로봇이 이동한 거리를 저장한다.

### 3.2 임피던스 모델

사람의 동작에 대한 정확한 임피던스 모델을 구하기 위하여 같은 시간에 대해 같은 위치에서 힘 데이터를 5 번씩 구한다. 이 데이터를 Least-Square 방식을 이용하여 인간의 임피던스 파라미터를 계산한다.

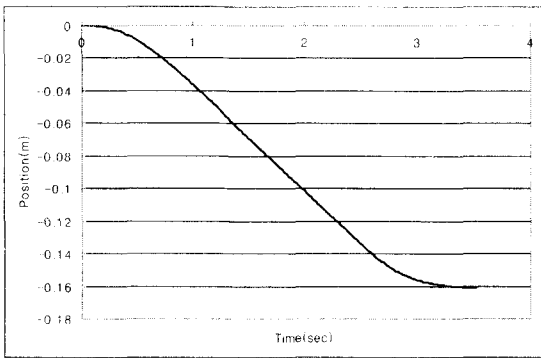


Fig. 3 Robot Position

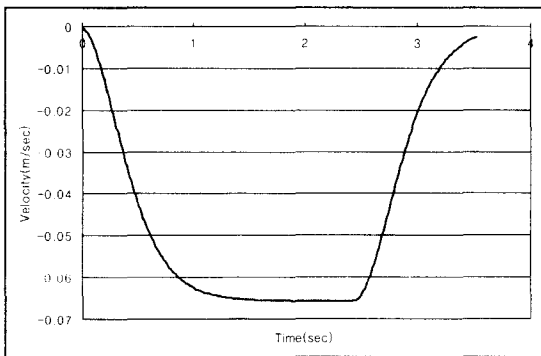


Fig. 4 Robot Velocity

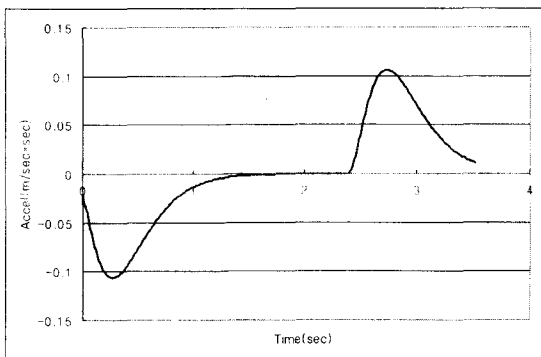


Fig. 5 Robot Acceleration

이러한 임피던스 모델링에서는 인간에 가장 유사

한 모델링은 어떤 것인지가 중요한 문제이다. 본 연구에서는 시간에 따라 변화하는 인간의 임피던스 파라미터를 속도에 대한 3 구간에서 근사화된 모델을 세우고 3 가지 형태의 모델링 방법을 제시한다. 그 중에 가장 적절한 모델을 제시하고 이를 실험을 통하여 입증한다.

Fig. 1 과 같은 실험 환경에서 로봇이 X<sub>1</sub> 방향으로 정해진 궤적을 따라 동작할 경우에 측정된 로봇의 위치, 속도, 가속도는 Fig. 3~5 와 같이 주어지며, 로봇의 말단에 부착된 힘 센서에서 측정된 힘 데이터는 Fig. 6 과 같다. 이 데이터는 인간의 임피던스 파라미터를 구하는데 사용되어진다.

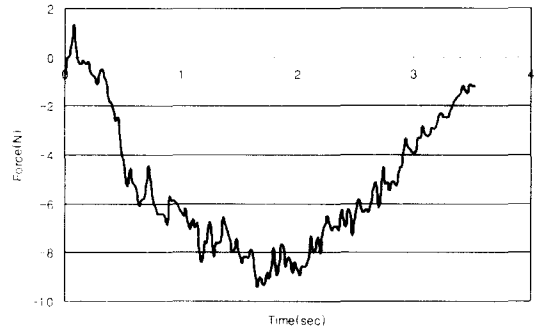


Fig. 6 Measured Force from F/T Sensor

#### 3.2.1 M, B, K 를 이용한 임피던스 모델

식 (1)에 대하여 시간  $t_a \sim t_b$  사이에서 측정된 위치, 속도, 가속도 데이터를 다음과 같은 행렬로 나타내고

$$U(t_a, t_b) = \begin{bmatrix} \ddot{x}_{t_a} & \ddot{x}_{t_{a+1}} & \cdots & \ddot{x}_{t_b} \\ \dot{x}_{t_a} & \dot{x}_{t_{a+1}} & \cdots & \dot{x}_{t_b} \\ x_{t_a} & x_{t_{a+1}} & \cdots & x_{t_b} \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

또한 시간  $t_a \sim t_b$  사이에서 측정된 힘 데이터를

$$F(t_a, t_b) = [F_{t_a} \ F_{t_{a+1}} \ \cdots \ F_{t_b}]^T \quad (3)$$

로 정의하고, 임피던스 파라미터는 다음과 같이 정의 한다.

$$\beta = [M \ B \ K]^T \quad (4)$$

그러면 식 (1)은 다음과 같이 정리된다

$$F = U\beta + e \quad (5)$$

여기서,  $e$ , 는 error 로서 이것을 최소화하는 성능 지수(performance index)는

$$J = \|e\|^2 = (F - UB)^T (F - UB) \quad (6)$$

과 같고 J를 최소화하는 조건은

$$\frac{dJ}{d\beta} = -2U^T (F - UB) = 0 \quad (7)$$

이 되는데  $(U^T U)^{-1}$  이 존재한다면 최적 파라미터  $\hat{\beta}$  은 다음과 같다.

$$\hat{\beta} = (U^T U)^{-1} U^T F \quad (8)$$

아래의 그림 Fig. 7 은 위의 방식을 사용하여 추정된 임피던스 파라미터들이 시간이 변함에 따라서 변화하는 모습을 나타낸다. 이 결과로부터 인간의 임피던스가 속도에 따라서 가변 한다는 것을 살펴볼 수 있다.

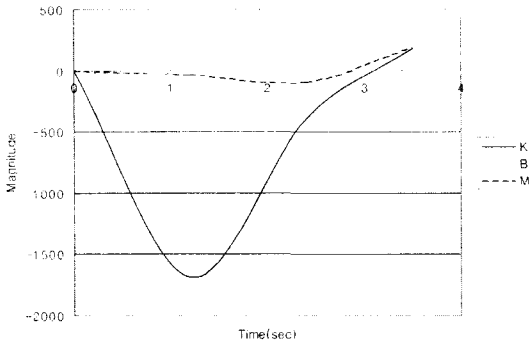


Fig. 7 Time Varying M, B, K

또한 속도에 대한 세 구간에 대하여 구한 결과는 Table 1 와 같다.

Table 1 M, B, K with 3 velocity region

가속도	M	B	K
$X'' > 0$	-1334.62	251.8332	-12.6211
$X'' = 0$	-288.065	243.4322	-48.6133
$X'' < 0$	130.5422	-11.6872	141.2082

하지만, 이 결과는 세 개의 파라미터가 음이 되는 경우가 발생한다. 이러한 결과는 물리적으로 존재할 수가 없으므로 결과적으로 발생한 인간의 동작에 대하여 M, B, K 모두를 고려한 임피던스 모델링은 적절하지 않은 것으로 판단된다.

### 3.2.2 B, M 를 이용한 임피던스 모델

두 번째는 B, M 만을 고려하여 인간의 임피던스를 모델링한다. 이 방식은 Inooka[9]가 제시한 방식과 동일하다. 다음의 운동방정식에 대하여

$$F_t = M \ddot{x}_t + B \dot{x}_t \quad (9)$$

시간  $t_a \sim t_b$  사이에서 시간에 따른 측정된 속도와 가속도를 행렬로 다음과 같이 정하고

$$U(t_a, t_b) = \begin{bmatrix} \dot{x}_{t_a} & \dot{x}_{t_{a+1}} & \dots & \dot{x}_{t_b} \\ \ddot{x}_{t_a} & \ddot{x}_{t_{a+1}} & \dots & \ddot{x}_{t_b} \end{bmatrix} \quad (10)$$

시간  $t_a \sim t_b$  사이에서 Force Data 를

$$F(t_a, t_b) = [F_{t_a} \ F_{t_{a+1}} \ \dots \ F_{t_b}]^T \quad (11)$$

로 정의한다

식 (8)에서와 마찬가지로 B, M 에 대한 시간에 대한 변화 유형은 Fig. 8 과 같다.

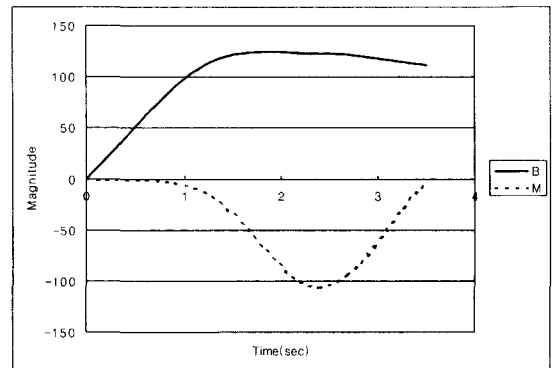


Fig. 8 Time Varying B, M

또한 속도에 대한 세 구간에 대하여 구한 결과는 Table 2 와 같다.

Table 2 B, M with 3 velocity region

가속도	B	M
$X'' > 0$	111.09332	-13.08385
$X'' = 0$	122.81586	-105.84522
$X'' < 0$	111.78885	-2.09623

그러나, 이 결과도 질량 계수가 음이 되는 결과를 살펴볼 수 있으므로 역시 적절한 모델링이 아니라고 판단된다. Inooka[9]는 이 문제를 질량 계수 양의 정수로 고정한 후 B 의 값을 활용하는 방식을 소개하였으나 이 방법의 문제점은 로봇과 인간

간의 협조 작업에 영향을 미치는 유효 질량 (effective mass)을 정의하는 방법이 어렵게 된다. 질량 계수를 정의 함에 따라서 인간의 임피던스 모델이 다양하게 변화되므로 정확한 임피던스 모델을 구하는데 어려움이 예상된다.

### 3.2.3 B, K 를 이용한 임피던스 모델

세 번째로는 협조 작업에서 M 을 인간과 로봇이 잡고 있는 물체의 실제 질량(0.35kg)을 실측하여 사용한다. 임피던스 파라미터중에 B, K 만이 변화한다는 가정을 이용하여 인간을 모델링하는 방법이다. 식 (1)을 다시 정리하여 B, K 를 구하는 방법은 다음과 같다.

$$F_i - Mx_i'' = Bx_i' + Kx_i \quad (12)$$

시간  $t_a \sim t_b$  사이에서 시간에 따른 측정된 속도와 가속도를 행렬로 다음과 같이 정하고

$$U(t_a, t_b) = \begin{bmatrix} \dot{x}_{t_a} & \dot{x}_{t_{a+1}} & \dots & \dot{x}_{t_b} \\ x_{t_a} & x_{t_{a+1}} & \dots & x_{t_b} \end{bmatrix}^T \quad (13)$$

시간  $t_a \sim t_b$  사이에서 Force Data 가

$$F(t_a, t_b) = [F_{t_a} \quad F_{t_{a+1}} \quad \dots \quad F_{t_b}]^T \quad (14)$$

로 주어질 때에, 식 (8)에서와 마찬가지로 B, K 에 대한 시간에 대한 변화 유형은 Fig. 9 와 같다.

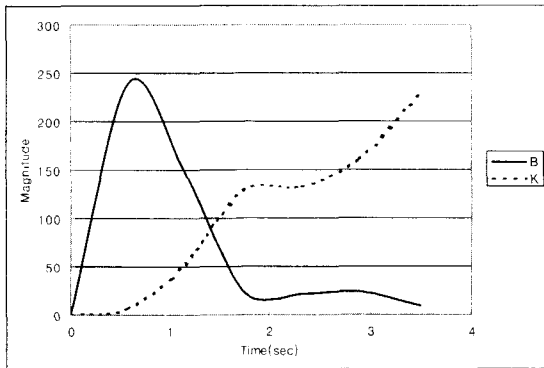


Fig. 9 Time Varying B, K

Fig. 9로부터 K, B 값이 양의 값으로 구해지므로 물리적으로 오류가 없음을 확인할 수 있다. 또한 속도에 대한 세 구간에 대하여 least square 방식을 이용하여 구한 결과는 Table. 3 과 같다. 따라서, Table. 3 에서 구한 K, B 를 모의 실험에 적용하여 추정된 임피던스 파라미터에 대한 타당성을 검증하고 두번째 단계인 인간이 로봇을 끌 때의 작업

에 적용하여 협조 작업을 수행하는 실험을 수행한다.

Table 3 Impedance parameters

가속도	B	K
$X'' > 0$	157.57852	47.20544
$X'' = 0$	21.65418	131.91838
$X'' < 0$	15.22019	155.56156

### 3.3 모의 실험

모델링의 타당성을 보이기 위한 모의 실험을 수행하였다. 그 방법은 먼저 로봇의 팔단 효과장치가 인간이 작업에 참여하지 않고 막대를 잡은 상태로 독자적으로 작업을 수행한다. 로봇의 위치 목표점은 임피던스 알고리즘을 이용하여 보조 CPU 보드에서 계산하여 움직인다. 가상적으로 인간이 협조 작업에서 발생시키는 힘 데이터는 로봇이 인간을 끌 때에 발생한 힘 데이터인 Fig. 6 과 같다고 가정한다. 또한 임피던스 파라미터는 Table. 3 과 같이 속도에 대한 3구간으로 나누어서 적용한다. 이때 사용되는 수식은 (12)식을 이용하며 적분을 수행하여야 하는데 일반적으로 많이 사용되는 방식인 Runge Kutta 를 이용한다. 이 경우 보조 CPU 보드에서 계산된 위치 데이터가 Fig. 3 의 위치 데이터와 같을 경우 타당성이 입증된다고 할 수 있다.

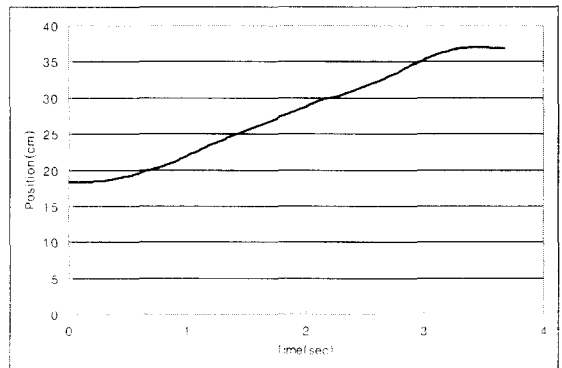


Fig. 10 Position Data For Simulation

이 경우의 위치 데이터는 Fig. 10 과 같다. 이것은 1 단계의 힘 데이터를 이용한 결과이며 Fig. 3 과 비교하여 0.02m 정도의 오차가 발생하였는데 이것은 인간의 임피던스를 속도에 대한 3구간으로 모델링한 결과로부터 초래된 오차로 판단된다.

또한, 일반적인 2차 시스템에서의 응답특성을 살펴보기 위하여 주어진 동작에서의  $\zeta$  (damping ratio)와  $\omega_n$  (natural undamped frequency)의 분포를 살펴보도록 한다.

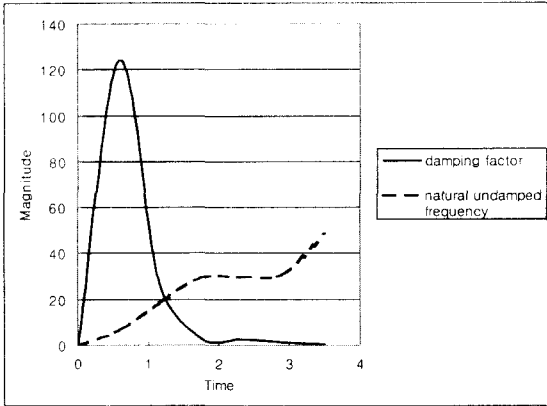


Fig. 11 Curve for Damping factor and Natural Unpamped Frequency

이 결과는 Fig. 11 과 같으며 속도가 가속과 등속에서는  $\zeta$  는 1 보다 큰 값을 가지므로 주어진 시스템은 overdamped 된 특성을 나타내어서 overshoot 이 없고 응답이 늦어지고, 감속 구간에서는  $\zeta$  가 1 보다 작은 값을 가지므로 빠른 응답 특성을 보이고 overshoot 이 있는 시스템이 된다. 그러므로 가속 구간에서 4cm, 등속 구간에서 5cm, 감속 구간에서 8cm 를 이동한 결과를 나타내게 되고, 결과적으로 이와 같은 Time-Domain 에서의 해석을 통하여 시스템은 비교적 안정하다고 판단 된다. 따라서, 인간이 Fig. 3 과 유사한 패턴의 힘 데이터를 로봇에게 발생시켜 준다면 그때의 위치 데이터가 Fig. 10 과 같은 결과를 야기시키게 되고 알고리즘의 타당성을 입증하는 결과가 되는 것이다.

#### 4. 인간의 임피던스 적용

##### 4.1 임피던스 적용방식

추정된 임피던스 파라미터를 로봇의 동작에 적용하는 방식에 대하여 살펴보도록 한다. 인간이 능동자의 역할을 하고 반대로 로봇이 수동자의 역할을 하는 경우에는 인간과 인간이 공동작업을 하는 것과 같이 로봇을 제어하여야 한다. 이를 위

해 1 단계 실험에서 추정된 인간의 임피던스 파라미터들을 로봇에 이식하여 적용하도록 한다. 그러면 로봇은 인간의 임피던스를 소유하여 마치 인간과 같은 특성을 지니게 되어 인간과 인간이 작업을 하는 것과 같은 특성을 가지게 된다. 그러나, 인간의 동작은 Fig. 3~ Fig. 5 에 주어진 로봇의 운동 궤적과는 반드시 일치하지 않으므로 Fig. 9 에서 구한 임피던스 파라미터를 각각의 궤적지점에서 그대로 적용할 수 없다. 그래서 Ikeura 그리고 Inooka[9]는 속도를 기준으로 두 구간으로 나누어 각 구간에서의 평균 임피던스 파라미터로 로봇의 동작을 제어하는 방식을 제시하였다. 그러나, Fig. 9 에서 살펴본 바와 같이 가속과 감속구간 그리고 등속구간에서 각각 서로 다른 임피던스 파라미터를 지니므로, 본 논문에서는 가속, 등속, 그리고 감속구간으로 이루어진 세 구간에 대하여 Fig. 6 의 실험 데이터를 활용하여 식 (15)와 같이 주어진 구간에 대하여 계산된 임피던스 모델의 평균값들을 실험에 적용하도록 한다.

$$\begin{aligned}
 F_1 &= M_a x_1'' + B_a x_1' + K_a x_1 \quad x'' > 0 \\
 F_1 &= M_u x_1'' + B_u x_1' + K_u x_1 \quad x'' = 0 \\
 F_1 &= M_d x_1'' + B_d x_1' + K_d x_1 \quad x'' < 0
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

##### 4.2 실험

2 단계인 로봇에게 속도에 따른 임피던스 알고리즘을 이식한 후에 인간이 능동자가 되고 로봇이 수동자가 되었을 때에 가속, 등속, 그리고 감속구간에서 계산된 임피던스 파라미터는 Table. 3 과 같다.

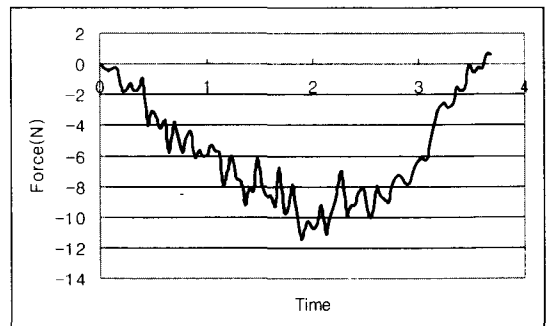


Fig. 12 Force Data

Fig. 12 는 인간이 능동자가 되어서 물체를 끌어당길 경우에 로봇의 말단에 부착된 F/T 센서에서 측정된 힘 데이터를 나타낸다. 이 힘 데이터를 이용

하여서 식 (12)와 같은 임피던스 모델에서 다음 샘플링 시간에서 로봇의 목표 위치는 Runge Kutta 를 이용하여 적분하여 계산하였다. 그리고 식 (15) 의 속도분포에 따라서 로봇에 Table 3 의 임피던스를 부여한 결과, Fig. 13 그리고 Fig. 14 와 같은 위치 및 속도 궤적이 실험적으로 구해진다. 이 결과는 Fig. 3 과 비교하여 이동 거리가 0.1m 정도 증가하였는데 이러한 차이는 인간이 발생시킨 힘 데이터가 Fig. 6 의 경우보다 약 1N 정도 증가한 결과이며, 또한 인간의 임피던스를 세 구간으로 모델링한 오차인 것으로 판단된다, 또한 Fig. 3 과 Fig. 13 간의 위치 데이터의 변화는 로봇의 기준 좌표계에서 본 로봇의 말단 효과 장치의 위치인테움적인 기준점의 변화로 생긴 결과이다.

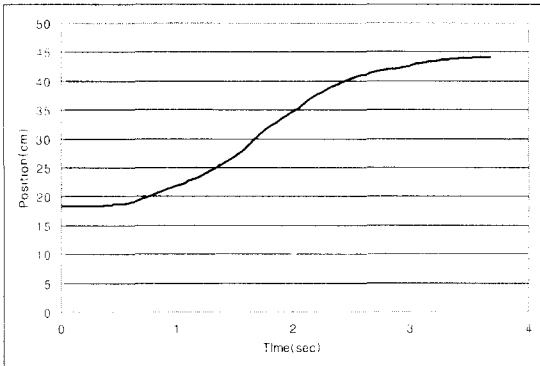


Fig. 13 Position Data

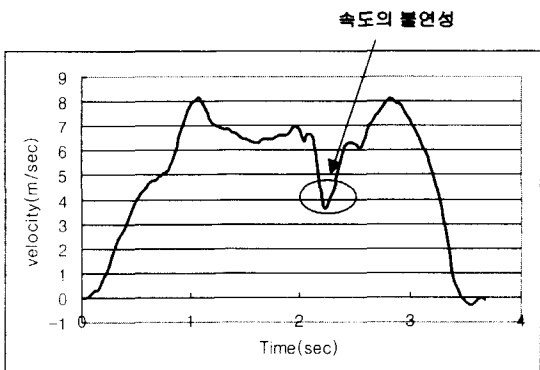


Fig. 14 Velocity Data

Fig. 14 의 속도곡선에서는 다소 불연속한 부분이 존재하는데 이러한 결과는 로봇을 인도하는 인간의 궤적이 로봇처럼 매우 정밀하지 못하기 때문

에 유발된 것으로 판단되며 인간의 임피던스 파라미터를 추정하여 인간과 로봇의 협조작업에 적용한 결과, 로봇과 협조 작업을 하는 인간이 불편함이나 부리한 힘을 느끼지 않음을 경험할 수 있었다.

## 5. 결론

본 논문에서는 인간과 로봇의 협조 작업에서 유용하게 사용될 수 있는 인간의 임피던스를 모델링하는 알고리즘을 제안하였다. 또한 속도에 따라서 변화하는 인간의 임피던스 모델을 가장 안정되게 모델링 할 수 있는 방법을 제안하였으며 추정된 임피던스 파라미터를 인간과 로봇의 협조작업에 적용하여 인간과 인간이 공동작업을 하는 것과 같은 효과를 얻을 수 있도록 하는 연구를 수행하였다. 비록 Ikeura 그리고 Inooka[9]가 유사한 연구를 수행하였지만 이들의 연구는 인간과 인간간의 협조작업에서 인간을 모델링하여 인간과 로봇의 협조 작업 모델에 적용하여 모델링에 모순이 있었으며 유효 질량(effective mass)에 대한 적절한 모델링없이 M 을 정의한 모순이 있었다. 하지만 본 논문에서는 가장 근사화 된 협조 작업시에 인간의 임피던스 모델을 적용하였다. 추후과제로는 제안된 알고리즘의 보다 일반화된 자유도로의 적용 그리고 인간과 로봇의 다양한 공동작업으로의 응용 등을 고려하고 있다.

## 후기

한국 학술 진흥 재단 자유 공모 과제에 의해 수행된 과제의 결과입니다.

## 참고문헌

1. K. Kaneko, H. Tokashiki, K. Tanie and K. Komoriya, "Impedance Shaping based on Force Feedback Bilateral Control in Macro-Micro Teleoperation System," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol. 1 pp. 710-717 1997.
2. H. Kazerrooni, "Human-Robot Interaction via the Transfer of Power and Information Signals," IEEE Trans. on System Cybernetics, Vol.20 no. 2 pp. 450-463, 1990.



3. N. Hogan, "Impedance Control: An Approach to Manipulation: Part I - Theory," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 107 pp. 1-24, March 1985.
4. H. Asada, and J. J. E. Slotine, "Robot Analysis and Control," John Wiley & Sons, 1986.
5. F. L. Lewis, C. T. Abdallah, and D. M. Dawson, "Control Of Robot Manipulators," Macmillan Publishing Company, 1993.
6. K. Kosuge, Y. Fujisawa, and T. Fukuda, "Control of a Man-Machine System Interacting with the Environment," *Int. J of Advanced Robotics*, Vol. 8 No. 4, pp. 427-441 1994.
7. Jong H. Park and Hyun C. Cho, "Impedance Control with Varying Stiffness for Parallel-Link Manipulators," *Proc. of the American Control Conference*, pp. 478-482, 1998.
8. Omar M. Al-Jarrah and Yuan F. Zheng, "Arm-Manipulator Coordination for Load Sharing using Compliant Control," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1000-1005, 1996.
9. R. Ikeura and H. Inooka, "Variable Impedance Control of a Robot for Cooperation with a Human," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3097-3102, 1995.
10. 홍석규, 김창호, 이병주, 서일홍, "인간의 임피던스 추정 및 로봇과의 협력 작업으로의 적용," *한국자동제어학술회의 논문집*, Vol. 2/2, pp. 1812-1815, 1997.
11. 최대성, 이수용, 김문상, 박상민, 송재복, "Tele-Operation For Humanoid Robot," *제어계측·자동화·로보틱스 연구회 합동 학술 발표회 논문집*, pp. 79-82, 1998.
12. 김희국, 이병주, "병렬형 3 자유도 구형 모듈의 해석과 힘 반영 원격조종기구의 구현," *대한 기계 학회 논문집*, 제 18 권, 제 10 호, pp. 1501~1513, 1994.