

## 인간의 임피던스 추정 및 로봇과의 협력 작업으로의 적용

### Estimation of Human Impedance and its Application to Collaboration Work with Robot

이흥석 규\*, 김창호\*\*, 이병주\*\*, 서일홍\*

\*한양대학교 전자공학과(Tel : +82-345-400-5172; Fax : +82-345-408-5803; E-mail:ihsuh@shira.hanyang.ac.kr)

\*\*한양대학교 제어계측공학과(Tel : +82-345-400-5218; E-mail:bj@hyunpl.hanyang.ac.kr)

**Abstracts** This paper treats the estimation of human impedance and their application to collaboration work with robot. 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 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.

**Keywords** Human Impedance, Impedance Estimation, Collaboration Work

#### 1. 서론

로봇 기술의 발달로 많은 로봇들이 다양한 산업현장에서 적용되어 왔으나 기존의 로봇은 알려진 환경 하에서 지정된 경로를 따라서 자동적으로 단순 반복동작을 하는 작업에만 사용되어 왔다. 또한 현재의 로봇은 인간과 격리된 환경에서 쓰이고 있으나 미래의 로봇은 인간과 로봇 간의 벽을 허물은 환경에서 쓰일 것이라고 예측된다. Service 로봇은 그 단편적인 예로서 로봇은 사무실 또는 가정에서 인간의 일을 도우는 역할을 하거나 인간과 공동작업을 하게 될 것이다. 이와 같이 로봇이 인간과 접촉을 하며 인간과 공동작업을 하는 경우에는 사람의 빠르고 즉흥적인 판단과 로봇의 힘을 효과적으로 접목하여 이용할 수 있을 것이다.

사람과 로봇이 접촉되어서 작업을 수행하려는 시도의 형태 들로는 Telerobotic System 과 Human Amplifiers 를 들 수 있다. Telerobotic System 의 경우 사람이 Master 가 되어 Vision 이나 Virtual Reality 를 통하여 Slave 인 로봇의 움직이는 상태와 환경을 고려하여, 로봇이 장애물을 만나거나 어느 환경에 접촉해 있을 때 사람이 로봇이 받는 힘을 감지하고 로봇의 동작을 적절히 조정하는 방식이다[1]. Human Amplifier 의 경우는 인간의 힘에는 한계가 있으므로, 사람이 내는 힘에 비례하게 기계가 힘을 내게 하는 것으로 사람의 어깨에 기계(기구)를 부착하여 사람이 내는 힘에 비례하게 그 기계가 힘을 내게 하는 방식이다[2]. 이것은 건설현장이나 혹은 사람의 신체의 한계로 도달할 수 없는 작업에 기계적 힘이 사람의 힘과 접목하여 큰 힘을 낼 수 있도록 쓰일 수 있다. 그러나, 위의 경우는 진정한 의미의 로봇과 사람의 협동작업은 아니다. 인간의 의사가 반영되면 인간의 판단에 의해 목적지를 찾아 갈 수 있고, 장애물을 회피하는 등의 로봇의 가이드 역할을 할 수 있는 등의 장점이 있으나 인간의 의사반영 이외에 로봇의 작업에 직접적인 도움을 줄 수 없는 단점이 있다. 예를 들면, 무거운 물건을 들어 나를 때 인간과 로봇이 공동으로 무게를 나누어야 하는데 사람은 가야 할 방향만을 정해 준다는 의미에서 실질적인 공동작업이라고 할 수 없다는 것이다.

이와 같이 인간과 로봇의 공동작업을 위해서는 첫 번째로, 로봇이 어떻게 사람에게 반응하여야 하는가? 어떻게 사람과 로봇이 물체의 무게를 나누어 들 것인가? 작업에 따라서 로봇과 인간의 역할을 어떻게 주어져야 하는가? 하는 문제에 봉착하게 되는데, 이 문제점들에 대한 접근방식으로는 로봇의 입장에서 사람이 어떻게 모델링할 것인가? 기존에는 임피던스라는 개념이 많이 사용되고 있다. 아니면 사람의 입장에서 보면, 로봇을 어떻게 사람처럼 자연스럽게 동작하게 할 것인가? 에 대한 연구문제로 귀결된다.

인간과 로봇의 협조작업은 기존에 로봇 자체만으로 할 수 없었던 다양한 작업을 할 수 있음을 예측할 수 있다. 이를 위해

서는 사람의 임피던스를 어떻게 정의하고, 측정할 것인가? 그리고, 인간과 같이 작업하는 경우에 어떻게 로봇을 제어할 것인가? 라는 기본적인 문제의 해결방안을 찾아야 하는바, 본 논문에서는 이러한 분야에 대한 문제해결의 시도를 하고자 한다.

인간과 로봇의 협조제어에 관한 연구는 중요도에 비하여 그 수가 적었고 내용도 1 자유도 시스템에 머무르는 매우 초보적인 단계이었음을 살펴볼 수 있었다.[3-5, 7-8] 따라서, 이에 본 논문에서는 인간-로봇간의 협조 작업에 있어서 변화하는 인간의 임피던스를 적용하는 방식을 제안한다. 우선, 로봇이 Leader 가 되고 인간이 Follower 가 되어 물체를 움직이는데 있어서 변화하는 인간의 임피던스를 물체의 안정성을 중심으로 고찰해 보고 이를 중심으로 인간과 로봇이 서로 협조하여 물체를 이동시킬 때 나타나는 인간의 임피던스를 실험적으로 구하여 보고, 마지막으로, 이때 구하여진 인간의 임피던스를 PT200 로봇에 적용하여 인간이 Leader 가 되고 로봇이 Follower 가 되어 로봇이 인간의 임피던스를 지니고 인간과 함께 협조작업을 하는 실험을 수행한다. 이 실험으로부터 인간과 로봇이 협조 작업하는 경우에 제안된 임피던스 추정 알고리즘의 효용성을 보인다.

#### 2. 인간의 임피던스의 특성과 적용

인간과 로봇의 협조작업에서는 다차 인간과 인간이 협조하여 일하는 것과 같은 편리함과 어색하지 않음과 위험성을 느끼지 않는 것이 중요하다. 따라서, 인간과 인간이 협조하여 일하는 패턴을 모사하기 위해서는 사람의 제어 방식을 모델링하고 습득하여 로봇에게 가르치는 것이 매우 중요하다. 많은 생체학자들은 사람의 제어 방식을 임피던스의 형태로 모델링하여 왔으며 Hogan[6,7]은 이러한 개념을 하나의 좋은 로봇 제어 방식으로 소개하였다. 사람이 공구를 잡고 정해진 궤적을 따라서 물체에 힘을 가하는 경우에 힘과 공구의 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 가속도, 속도, 그리고 위치벡터를 각각 나타낸다. 그리고 M, B, K는 각각 관성, 댐핑, 그리고 강성을 나타내는 6 x 6 임피던스 행렬식을 나타낸다. 인간은 작업의 특성에 알맞게 이러한 세 개의 임피던스 행렬을 순간 순간 바꿔가며 작업을 하고 있는 것이다. 여기서 각각의 임피던스 행렬은 물리적 상황에서 항상 대칭이므로 각각 21개씩의 독립변수를 가지며 따라서, 도합 63개의 독립변수가 존재한다. 또한 일반적으로 이들 63개의 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 실

힘에 국한되어 왔다. Zheng[8]은 인간과 로봇이 물체를 들어 올리는 협조작업에서 사람의 임피던스 중 Stiffness 성분  $K$ 만을 고려한 경우에 대한 실험을 하였다.  $K$ 는 일반 공간에서  $6 \times 6$  이고, 위에서도 말한대로 21개의 독립변수를 가지고 있지만 한 방향의 강성에 대해서 그리고 Velocity-varying이 아닌 일정한 값으로 국한된 경우만을 고려하였다. 본 논문에서는 기존에 발표된 이론들을 일반적인 경우로 확장하고 가장 간단한 1자유도 모델에 대한 인간-로봇 협조작업에 대하여 실험으로 증명해 보인다.

### 3. 인간의 임피던스 측정

로봇과 사람이 물체를 견고하게 잡고 있다고 가정하고 로봇이 미리 계획된 경로를 따라서 움직이면 사람은 물건을 잡고 따라가게 된다. 로봇 관절에 부착된 Encoder의 정보로부터 각 관절의 위치를 예측하며 이를 미분하여 각속도 및 각속도 정보를 얻는다. 이러한 정보는 정방향 기구학에 의하여 인간이 잡고 있는 지점의 위치, 속도, 그리고 가속도를 산출하게 한다. 또한 인간이 물체에 가한 힘은 손잡이에 부착된 F/T Sensor를 이용하여 측정한다.

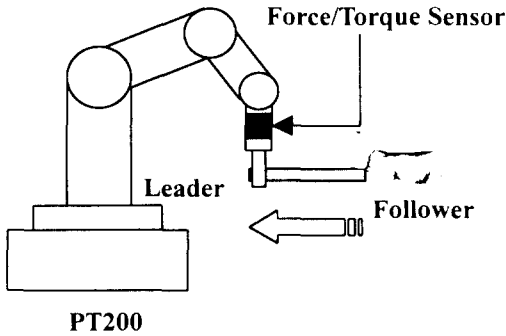


그림 1. 인간의 임피던스를 측정하기 위하여 인간과 로봇이 협력 작업하는 실험  
Figure. 1 Human-Robot Cooperation work to measure the Human Impedance

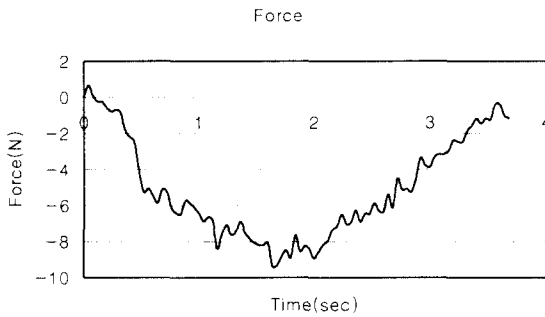


그림 2 F/T 센서로부터 측정된 힘  
Fig. 2 Measured Force from F/T sensor

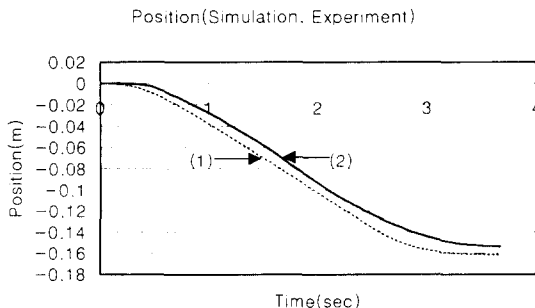


그림 3 로봇의 Trajectory와 Simulation 결과의 비교  
Fig. 3 Comparison between robot trajectory and simulation result

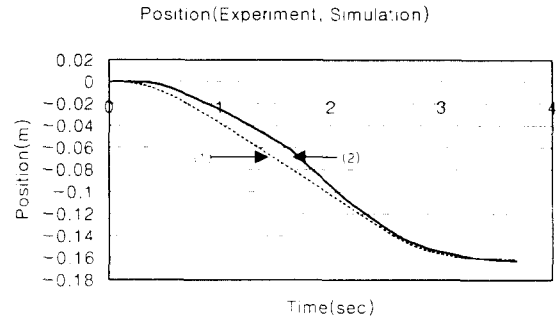


그림 4 로봇의 Trajectory와 Simulation 결과의 비교  
Fig. 4 Comparison between robot trajectory and simulation result

#### 3.1 실험 환경

6축 로봇인 PT200이 Master로서 인간의 Leader가 되고 인간이 Follower가 되어 로봇의 움직임을 따라간다. 이 때 실험 환경은 그림 1과 같다. 그림 1에서 측정된 Force Data는 그림 2에 주어졌고, Position Data는 그림 3과 4에 나타나 있는데, (1)은 실험으로 구한 로봇의 실제 Trajectory를 나타내고, (2)는 Simulation으로 얻은 Trajectory를 나타낸다 인간은 협조 작업시에 물체에 대하여 이동하는 반대 방향으로 힘을 느끼게 되며, 좌표축은 로봇의 처음 위치를 영점으로 정한다.

#### 3.2 인간의 임피던스 추정

그림 3에 표시된 Simulation Data(2)는 인간의 임피던스를 구하여 이를 인간이 가해준 Force Data를 이용하여 로봇이 움직이는 Trajectory를 추정해 낸 것이다. 인간의 임피던스는 로봇의 속도에 따라 가속 등속 감속 3부분으로 나누어 구하였으나 가속과 감속구간에서는 유사한 임피던스 특성을 지니게 되므로 가속, 등속 2부분의 Data만을 적용하여 Simulation 하였다. 또 정확한 인간의 임피던스를 구하기 위하여 같은 시간에 따라 같은 위치에서 Force Data를 5번씩 얻어 Least squares 방식으로 원하는  $M, B$  값을 얻는다.

1 차원 Motion에서 다음과 같은 선형 모델을 고려한다.

$$F = M_1 \ddot{x} + B_1 \dot{x}, \quad \dot{x} < v_0$$

$$F = M_2 \ddot{x} + B_2 \dot{x}, \quad \dot{x} \geq v_0 \quad (2)$$

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

$$U(t_a, t_b) = \begin{bmatrix} \ddot{x}_{t_a} & \ddot{x}_{t_a+1} & \cdots & \ddot{x}_{t_b} \\ \dot{x}_{t_a} & \dot{x}_{t_a+1} & \cdots & \dot{x}_{t_b} \end{bmatrix} \quad (3)$$

시간  $t_a \sim t_b$  사이에서 시간에 따른 Force Data를,

$$F(t_a, t_b) = [F_{t_a} \quad F_{t_a+1} \quad \cdots \quad F_{t_b}]^T \quad (4)$$

로 나타내면, 이에 따라서 (2)식은 아래와 같이 정의 된다.

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

여기서,

$$\beta = [M \quad B]^T \quad (6)$$

식 (5)로부터 Least Squares 방식에 따라서  $M$  과  $B$  는 다음과 같이 구해진다.

$$\hat{\beta} = (U^T U)^{-1} U^T F \quad (7)$$

그림 5에서는 실제 Least Squares 방식으로 구한  $M$  과  $B$  값의 시간에 따른 변화량을 보이고 있다. 그러면 이러한  $M, B$  값의 물리적인 의미를 먼저 살펴보고자 한다. 그림 6은 그림 5에 나타나 있는 시간에 따른  $M, B$  값의 양을 물리적으로 해석하기 위한 선도로써 전체를 5 단계로 나누어  $M, B$  값의 변화량을 나타낸 것이다. 우선 6-(1)은 물체의 관성 효과가 운동방향 반대 방향으로 작용하면서 이동을 시작하려는 단계이다. 6-(2)는 물체의 관성 효과가 운동 방향의 반대로 작용하면서 물체는 가속되는 과정이다.

## 4. 인간 임피던스의 적용

시간에 따른 M, B 값의 변화

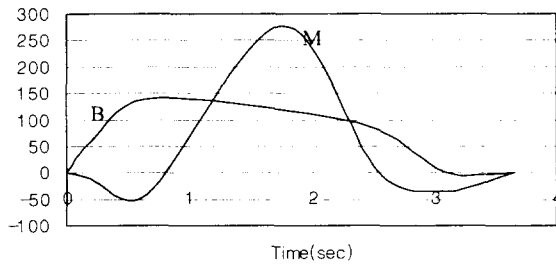


그림 5 시간에 따른 M, B 값의 변화  
Fig. 5 Time varying M, B

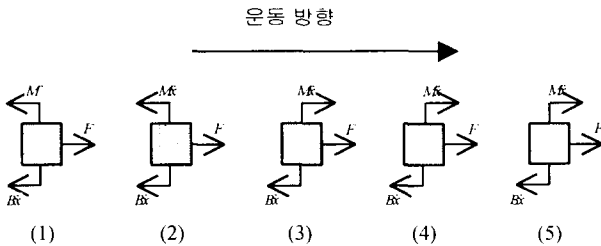


그림 6. 측정된 인간 임피던스에 근거한 인간 동작의 해석  
Fig. 6 Analysis of human behavior based on the estimated human impedance

그런데 이와 같이 음의 질량을 갖는 경우는 물리적으로 존재하지 않는 예이다. 이 때문에 이와 같은 M, B 값을 그대로 Simulation에 적용시키면 원하는 Trajectory가 나오지 않고 발산해 버리는 결과를 초래한다. 6-(3)은 관성 효과가 운동 방향으로 향하면서 가속하는 것을 의미 하지만 이 때의 Damping Factor는 Mass 요소가 가속 시키는 것을 적당히 막아 주면서 물체를 등속 운동 시켜 준다. 6-(4)와 6-(5)는 물체가 정지하려는 현상으로서 감속 시켜 주는 역할을 한다. 앞에서 언급하였던 현상 때문에 이 M, B의 값을 그대로 적용하여 로봇의 Trajectory를 얻기에는 무리가 있다. 그러므로 Mass의 값을 임의로 정한 뒤 Damping은 그림에서 나타나는 M과 B 값의 비율을 이용하여 정하도록 한다.

표 1. 속도에 따라 2부분으로 나눈 인간의 임피던스 값  
Table 1 Determined impedance parameters with 2-velocity region.

	M	B
$V < 0.065$	5	139
$V \geq 0.065$	5	109

표 2. 속도에 따라 3부분으로 나눈 인간의 임피던스 값  
Table 2 Determined impedance parameters with 3-velocity region

	M	B
$V < 0.03$	5	139
$0.03 \leq V < 0.063$	5	118
$V \geq 0.063$	5	81

표 1은 속도 분포를 두 구간으로 나눈 경우의 M, B를 나타내며, 이러한 임피던스 값을 적용하여 로봇 Trajectory에 대한 시뮬레이션을 수행한 결과 그림 3의 (2)에서와 같이 원래의 Position을 잘 따라감을 나타낸다. 그리고 좀 더 세분화 시켜진 속도 구간을 3개로 나누었을 때의 Simulation은 그림 4의 (2)에 나타나 있고 좀 더 정확한 Position 제어가 됨을 알 수 있다.

### 4.1 실험 환경

본 절에서는 그림 7에서와 같이 인간이 Trajectory를 부여하고 인간과 같은 임피던스를 지닌 로봇이 추종하는 실험을 수행한다. 그림 8은 로봇 제어기의 전체 블록도이고, 그림 9은 임피던스 제어시스템의 블록 다이어그램을 나타낸다. 인간이 가하는 힘에 의해 로봇은 속도에 따라 서로 다른 임피던스를 지니고 움직이게 된다.

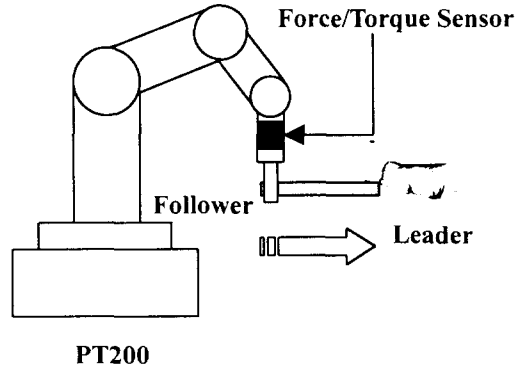


그림 7 인간의 임피던스를 지닌 로봇과 인간이 협력 작업  
Fig. 7 Collaboration work between human and robot having impedance like human.

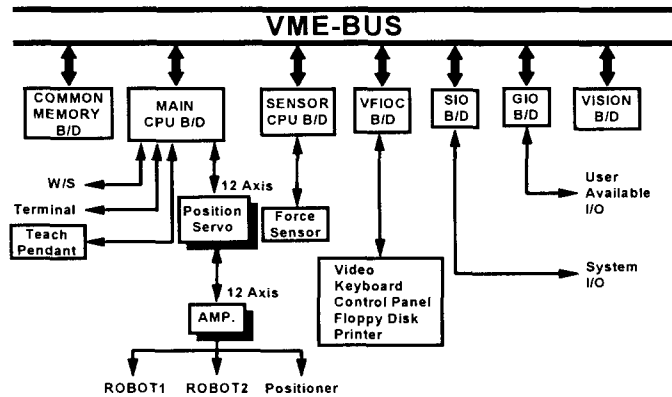


그림 8 다중 로봇 제어시스템의 하드웨어 구조  
Fig. 8. Hardware architecture of the multi-robot controller.

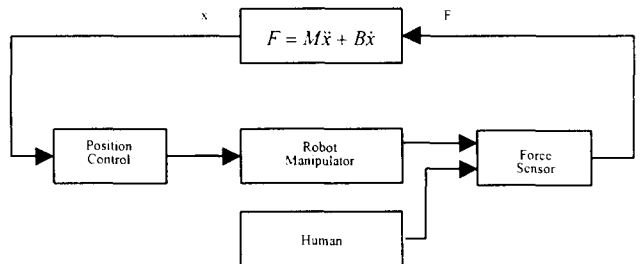


그림 9. 임피던스 제어 시스템의 블록 다이어그램  
Fig. 9 Impedance control system block diagram.

### 4.2 실험 결과

그림 10과 11은 각각 인간의 임피던스를 지닌 로봇이 인간을 추종하는 실험에서 로봇에서 측정된 힘과 Position Data를 나타낸다. 이 실험에서 로봇에 주어진 임피던스는 표 2에 근거한다.

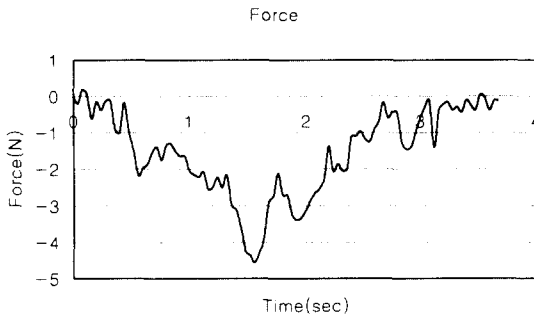


그림 10 F/T 센서로부터 측정된 힘  
Fig. 10 Measured Force from F/T sensor

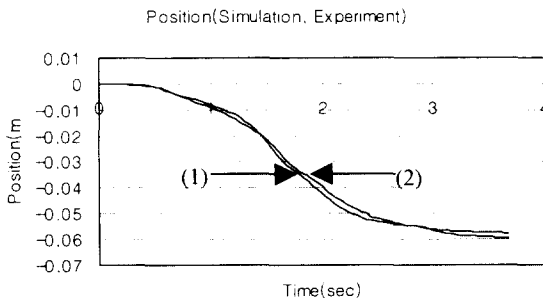


그림 11 로봇의 trajectory와 Simulation 결과의 비교.  
Fig. 11 Comparison between robot trajectory and simulation result.

그림 11의 (1)은 로봇의 실험에서 측정된 Trajectory 이고 (2)는 Simulation 결과를 나타내는데 실험결과로부터 인간의 임피던스를 로봇에 적용한 경우 실험 결과와 일치하는 결과를 얻을 수 있다.

## 5. 결론

본 논문에서는 인간과 로봇의 협동작업에서 인간의 임피던스를 예측하는 알고리즘을 제안하였고, 실제로 실험을 통하여 임피던스를 구한 후 로봇에 적용하는 실험적 연구를 수행하였다. 인간의 임피던스를 로봇에 적용시키는 연구는 아직까지 매우 초보적인 단계이다. 본 논문에서는 1 자유도의 경만 살펴 보았는데 다자유도 시스템에 대하여 인간의 임피던스를 적용시키는 알고리즘, 또한 인간과 로봇이 협조 작업 중에 Load Sharing 하는 알고리즘의 개발 등은 앞으로 연구해야 할 과제이다.

## 참고문헌

- [1] B. Hannaford. "A design framework for teleoperators with kinesthetic feedback." *IEEE Transactions*.1991
- [2] H. Kazerrooni. "Human\_Robot Interaction via the Transfer of Power and Information Signals". *IEEE Tans. on sys. man and cybernetic*. Vol.20 no. 2 pp.450-463, March 1990
- [3] K.Kosuge. H. Yoshida. D.Taguchi. T.Fukuta. "Robot human Collaboration for New Robotic Applications". *Int. Conf. on Robotics and Automation*. 1994
- [4] K.Kosuge. Y.Fujisawa. toshio Fukuda. "Mechanical system Control with Man- Machine-Environment Interactions". *Int. Conf. on Robotics and Automation*. Minnesota. pp 1000-1005.1993.
- [5] K.Kosuge. Y.Fujisawa. toshio Fukuda. "Control of Mechanical System with Man- Machine Interacton". *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. PP.87-92. 1992
- [6] N. Hogan. "Impedance Control: An Approach to Manipulation: Part1 -Theory". *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and*

*Control*.Vol .107 pp.1-7. March 1985.

- [7] N. Hogan. "Impedance Control: An Approach to Manipulation: Part2- Implementation". *Transactions of the ASME*. Vol.107 PP.8-16. March 1985.
- [8] Omar M.Al-Jarrah and Yuan F. Zheng. "Arm-Manipulator coordination for load sharing using compliant control". *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*. Minneapolis. April 1996.
- [9] R.Ikeura and H. Inooka. "Variable Impedance Control of a Robot for Cooperation with a Human". *Int.Conf. on Robotics and Automation*.pp 3097-3102. 1995.