

인간의 안전을 고려한 인간과 로봇의 협조 작업을 위한 제어기 설계

• 문태균⁽¹⁾, 오상록⁽²⁾, 박귀태⁽¹⁾

(1)고려대학교 전기공학과, (2)한국과학기술연구원 지능제어 연구센터

Design of a control algorithm for human-robot cooperation with consideration of hum

• Tai-Kuin Mun⁽¹⁾, Sang-Rok Oh⁽²⁾, Gwi-Tae Park⁽¹⁾

(1)School of Electrical Eng., Korea Univ (2)Div. of Elec. & Info. Tech., Korea Institute of Scienc

Abstract - In this paper, a control algorithm which enables robot to cooperate with human is proposed. The method senses the humanbeing's intention by using force/torque sensor attached at the end effector and moves and cooperates as intended by humanbeing. The method also considers safety of the humanbeing by adjusting and limiting the robot speed automatically. The proposed method is verified its performance by computer simulation and experiments for the 2-DOF DD(Direct Drive) Arm in real-time

1. 서 론

산업 현장에서 이제까지 사용되어 온 로봇은 로봇 단독으로 작업을 수행하여 왔다. 그러나 로봇의 지능부족 등의 이유로 대부분의 로봇은 인간이 입력한 일정한 궤적을 따라 반복적으로 움직이는 등의 단순한 작업만을 수행하였다.

만일 높은 지능이 필요한 작업, 예를 들어 모델링이 되어 있지 않은 환경에서 로봇에게 지능을 부여하여 동작시킬 때에는 여러 가지 센서들(비전 센서, 초음파 센서, 힘 센서 등)을 사용하여 작업을 수행하여야 한다. 그 이유는 로봇은 주위 환경에 대한 정보를 갖고 있지 못하기 때문이다. 이렇게 할 때에는 많은 비용이 들어가며 복잡한 알고리즘이 사용되게 된다. 하지만 인간은 오감을 사용하여 주위 환경에 대한 정보를 가진다. 만일 이런 인간의 지능과 로봇을 함께 사용하면 여러 가지의 센서와 복잡한 알고리즘을 함께 사용하지 않고도 모델링이 되어 있지 않은 주위 환경에서 로봇을 동작하게 할 수 있다. 인간과 로봇이 함께 작업을 수행하는 방법에 대해서는 teleoperation[1], manipulator extender[2], 인간의 impedance 추정[3][4][5]등의 많은 연구가 되어져 왔다. 하지만 teleoperation은 인간이 로봇의 작업 공간 밖에서 작업을 하므로 진정한 협조 작업이라 말 할 수 없고, manipulator extender는 인간이 준 힘에 비례한 큰 힘을 내게 하므로 자칫 큰 힘이 들어가면 위험한 동작을 할 수 있다. 인간의 impedance 추정 등을 통한 작업에서는 extender가 갖고 있는 장점을 사라지게 하였다. 그리고 대부분의 연구가 1자유도 운동에만 적용되어 왔다.[2][3][4][6]

이 논문에서는 인간과 로봇 매니플레이터가 공동으로 작업을 수행한다. 작업의 내용은 하나의 물체를 초기 위치에서 인간이 운반해 놓으려 하는 목표 위치로 이동하는 것이다. 그리고 실험에 적용될 때에는 2차원 평면 운동이 가능한 2-link DD(Direct Drive) arm 로봇에 적용되어 시험된다. 본 연구의 고려 사항은 다음과 같다.

첫째, 인간이 핸들을 붙잡고 힘을 준 방향으로 로봇이 추종해야 한다. 이러한 방향성이 왜곡되면 작업을 하고자 하는 인간의 의도대로 작업이 이루어지지 않는다.

둘째, 인간이 주는 힘의 크기가 반영되어야 한다. 즉 인간이 한 방향에 대해 힘을 크게 줄 경우, 인간의 의도

는 로봇이 빨리 움직이기를 바라는 것이다. 만일 동일한 방향에 대해 힘을 적게 주는 경우는 로봇이 천천히 움직이기를 바라는 것이다. 이러한 인간의 의도가 로봇의 동작에 실려야 한다.

셋째, 인간이 느끼는 안정성을 고려해야 한다. 인간은 로봇에 붙어있는 핸들을 붙들고 로봇의 작업 공간 안에서 로봇과 근접하여 작업을 해야한다. 만일 이 때 인간이 준 힘이 클 경우 로봇은 인간이 조종할 수 있는 속도보다 더 빠르게 움직일 수 있다. 이런 경우 인간에게 부상을 입히거나 위험을 줄 수 있게 된다. 따라서 이런 상황에 대비해 인간이 느끼는 안정성을 고려해야한다.

넷째, 인간이 원하는 위치까지 로봇 끝단을 이동시킨 후 인간이 핸들에서 손을 놓았을 경우, 로봇은 그 위치에 그대로 정지하여야 한다. 이 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 전체 로봇의 구성과 인간과 로봇의 협조 작업을 위한 제어 구조를 제안한다. 3장에서는 damping 상수의 역수를 이용하여 인간의 안전과 로봇의 조작성을 확보하는 방법을 소개한다. 4장에서는 2장과 3장에서 제안한 제어기를 2-link arm 로봇에 적용하여 수행한 시뮬레이션 결과를 보인다. 5장에서는 실험을 통해 여기서 제안된 제어 구조가 실제 2-link DD(Direct Drive) arm에 대해 잘 적용됨을 보인다. 6장에서는 결론을 내린다.

2. 로봇의 구성 및 제안된 제어구조

2.1 로봇의 구성

인간과 협조 작업을 하기 위한 로봇의 구성은 그림 1과 같다.

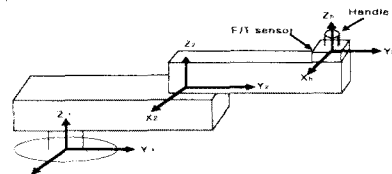


그림 1 : 인간과 로봇의 협조 작업을 위한 로봇의 구성

그림 1에서 로봇 끝단에 힘/토크 센서를 부착하고 그 위에 인간이 조정할 핸들을 연결한다. 힘/토크 센서에는 센서 좌표계가 부착되어있다. $F_h \in \mathbb{R}^6$ 는 인간이 핸들을 잡고 움직여서 센서에 주는 힘과 모멘트로 센서 좌표계에서 표현되며 $F_{hF} \in \mathbb{R}^3$ 와 $F_{hM} \in \mathbb{R}^3$ 로 나뉘는데 여기서 F_{hF} 는 인간에 의해 생긴 힘에 대한 값이고 F_{hM} 은 인간에 의해 생긴 모멘트에 대한 값을 의미한다. 이때 F_{hF} 는 인간이 핸들에 가한 힘으로 로봇의 끝단이 움직여야 할 방향과 속력을 지시하는 정보로 사용된다.

2.2 Switching Mode를 갖는 제안된 제어구조

인간은 로봇의 끝단에 위치한 핸들에 힘을 가하여 로봇에게 인간의 의도를 전달한다. 이 때 인간이 핸들에 힘을 주지 않더라도 힘/토크 센서가 갖고 있는 kinematic offset이나 힘/토크 센서의 noise로 인해 센서 값이 들어 올 수 있다. 특히 인간이 힘을 주다가 놓았을 경우 센서가 로봇과 핸들 사이의 물림 상태가 backlash로 인해 미세하게 어긋날 경우 원하지 않는 힘이 센서에 계속적으로 전달될 수 있다. 이런 경우 로봇의 원하는 운동 궤적이 변할 수 있다. 이러한 현상을 막기 위해 힘에 대한 경계 값(F_{bound})을 설정하여 그 값보다 큰 센서 값($|F_{bF}|$)이 들어 올 경우는 로봇 끝단을 원하는 위치로 움직이게 할 때의 제어 모드(운동 모드)로 동작하게 하고 그 경계 값보다 작은 값이 들어 올 경우 로봇을 원하는 위치에서 멈추게 하는 제어 모드(정지 모드)로 동작하게 한다. 각각의 내용은 다음과 같다.

2.2.1 인간과 로봇의 협조 작업 시 로봇 끝단을 원하는 위치로 이동시키는 제어 모드($|F_{bF}| \geq F_{bound}$ 일 때)

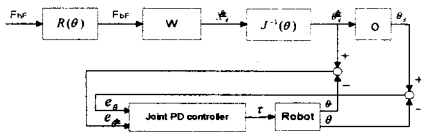


그림 2 : 로봇 끝단을 원하는 위치로 이동시키는 제어 모드($|F_{bF}| \geq F_{bound}$ 일 경우)

그림 2에 나타나 있는 내용 중 인간의 의도를 절대 좌표계에서의 힘으로 표현한 F_{bF} 를 사용하여 로봇이 움직여야 할 방향과 속력을 결정한다. 로봇의 끝단이 움직여야 할 방향은 힘의 방향과 일치하도록 하고 로봇 끝단이 움직여야 할 속력은 인간의 힘의 크기와 비례하게 하는 원칙하에서 다음과 같은 식이 성립한다.

$$\dot{X}_d = wF_{bF} \quad (1)$$

여기서 w 는 물리적으로 damping 상수의 역수이며 scalar이다. 즉 damping 상수는 물리적으로 그 값에 비례하여 어떤 물체의 움직임을 방해하는 정도를 나타낸다. 이러한 damping 상수의 역수는 그 값에 비례하여 어떤 물체의 운동을 원활하게 하는 정도를 나타낸다. 이러한 물리적 성질을 이용하는 이유는 힘과 속도의 관계를 기술하는 w 를 사용하여 인간의 의도, 즉 인간이 주는 힘에 따라 로봇 끝단의 속도를 원하는 속도로 만들어 내기 위함이다. 이 개념은 Whitney[7]가 로봇이 벽과 접촉이 일어났을 때 로봇과 벽의 접촉으로 인해 발생한 힘/토크를 feedback받아서 적절한 움직임을 만들어내는 데 처음 사용했던 것이다. 여기서는 이 식을 인간의 힘과 로봇 끝단의 속도와 대응시키는데 사용한다.

2.2.2 인간과 로봇의 협조 작업 시 로봇 끝단을 원하는 위치에 정지시키는 제어 모드($|F_{bF}| < F_{bound}$ 일 때)

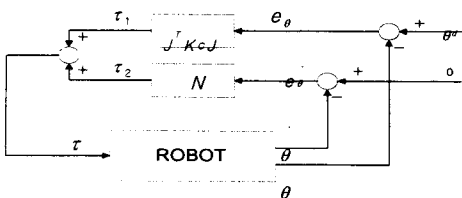


그림 3 : 로봇 끝단을 원하는 위치에 정지시키는 제어 모드($|F_{bF}| < F_{bound}$ 일 경우)

그림 3의 내용에 나타나 있는 것과 같이 이 제어 모드에 대한 기본적인 이론은 Salisbury[8]가 제안하여 일반화된 passive compliance controller를 근간으로 한다. passive compliance controller는 정해진 위치에 대해 compliant motion을 할 수 있게 한다. 하지만 인간과 로봇의 협조 작업에서 인간이 핸들에 힘을 주고 움직이다가 mode switching이 일어날 때 로봇이 갖고 있는 관성으로 인한 과도한 로봇의 동작을 적절히 정지시키기 위해 damping을 추가하는 것이 바람직하다.

3. 인간의 안전을 고려한 w 결정 방법

일반적으로 인간이 줄 수 있는 최대 힘의 크기와 인간이 작업하는 일반적인 힘이 상당히 차이가 난다. 따라서 이런 인간의 상황을 고려하여 인간이 작업을 위해 일반적으로 주는 힘의 크기 주변에서는 그 힘의 크기에 비례하여 로봇 끝단의 속력을 조정하고 갑작스런 큰 힘에 대해서는 제한된 속도 이상으로는 동작하지 않도록 한다. 하지만 이러한 경우에도 인간이 준 방향에 대한 정보는 왜곡되지 않도록 한다. 이러한 고려 사항을 반영하여 w 를 그림 4와 같이 bipolar sigmoid 함수로 설정한다.

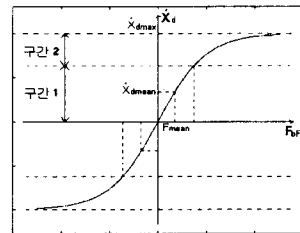


그림 4 : 인간의 안정성을 고려한 w 결정 방법

그림 4에서 구간 1은 선형에 근사한 구간으로 볼 수 있다. 이 구간의 중간 지점에 인간이 일반적으로 주는 힘의 세기에 대한 로봇 끝단의 원하는 속도가 대응된다. 구간 2에서는 인간의 안정성을 위해 설정한 최대 속력으로 수렴하는 구간이 된다. 이 경우 비 선형적인 대응이 심하게 된다. 두 구간 사이를 하나의 함수로 연결하는 이유는 로봇의 동작에 대해 인간이 느끼기에 급격한 변화를 느끼지 않게 하기 위함이다.

관계식은 다음과 같다.

$$\dot{X}_d = wF_{bF} = \frac{|\dot{X}_{dmax}|}{|F_{bF}|} \frac{(1 - e^{-\sigma|F_{bF}|})}{(1 + e^{-\sigma|F_{bF}|})} F_{bF} \quad (2)$$

여기서

$$\dot{X}_d (\in \mathbb{R}^3) = [\dot{x}_d \ \dot{y}_d \ \dot{z}_d]^T \text{ 이고 } \dot{X}_{dmax} \text{는 상수이다.}$$

또한 $|F_{bF}| = \sqrt{F_{bx}^2 + F_{by}^2 + F_{bz}^2}$ 이다.

$\dot{X}_{dmax} (\in \mathbb{R}^3)$ 는 인간이 직접 설정하여 준다. \dot{X}_{dmax} 를 설정할 때에는 인간이 위험을 느끼기 시작하는 최고 속력을 고려한다. 이렇게 하므로 로봇은 어떠한 큰 입력(인간이 준 힘)에 대해서도 안전한 속도 이상으로는 동작하지 않는다. 이것과 함께 중요한 사항은 무리없이 인간이 조작할 때에 주는 힘의 크기와 로봇 끝단의 속력간의 선형 관계를 확보하는 것이다. 이것은 σ 를 결정하므로 가능하게 된다.

$$\dot{X}_{dmean} = \frac{\dot{X}_{dmax}}{3} \quad (3)$$

F_{bmean} 은 인간이 무리없는 조작을 할 때에 핸들에 전달하는 힘이고 \dot{X}_{dmean} 는 F_{bmean} 의 힘이 들어왔을 때 로

봇 끝단이 움직여지길 바라는 속력이다. 이렇게 설정한 \dot{X}_{dmean} 과 F_{mean} 를 사용하여 σ 를 결정할 때는 곡선이 $(2F_{mean}, 2\dot{X}_{dmean})$ 를 지나도록 σ 를 결정한다.

$$2\dot{X}_{dmean} = \frac{|\dot{X}_{dmax}|}{|2F_{mean}|} \frac{(1 - e^{-\sigma|2F_{mean}|})}{(1 + e^{-\sigma|2F_{mean}|})} 2F_{mean} \quad (4)$$

식(4)를 σ 에 대해서 풀면 다음과 같다.

$$\sigma = -\frac{1}{2F_{mean}} \ln\left(\frac{\dot{X}_{dmax} - 2\dot{X}_{dmean}}{\dot{X}_{dmax} + 2\dot{X}_{dmean}}\right) \quad (5)$$

이렇게 해서 구해진 σ 를 식(2)에 넣어 사용한다.

4. 시뮬레이션

4.1 시뮬레이션 환경

시뮬레이션을 위해 2축 arm 로봇의 dynamics를 모델링하고 Runge - Kutta 4차 method를 사용하여 dynamic equation을 풀었다. 컴파일러는 Visual C++이고 display를 위해 OpenGL library를 사용하였다. 시뮬레이션 모습은 다음과 같다.

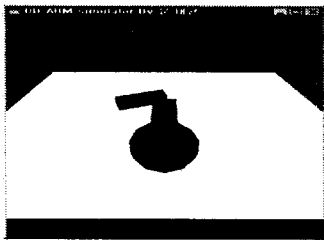


그림 6 : OpenGL library를 사용한 Simulator

4.2 사양 및 파라미터 설정

시뮬레이션을 위한 2 link arm의 사양은 다음과 같다.

$l_1=0.4(m)$ $l_2=0.3(m)$ $m_1=10(Kg)$, $m_2=3(Kg)$ 이다 파라미터 설정은 다음과 같다. $K_{P1}=50$ $K_{P2}=50$ $K_{D1}=6$ $K_{D2}=6$ 이며 mode switching을 판단하는 F_{bound} 는 $0.1(N)$ 이고 $F_{mean}=1(N)$, $\dot{X}_{dmax}=0.3(m/s)$, $\dot{X}_{dmean}=0.1(m/s)$ 이다. 이 때 $K_c = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 100 \end{bmatrix}$ 이며, $N = \begin{bmatrix} 200 & 0 \\ 0 & 200 \end{bmatrix}$ 이다.

4.3 시뮬레이션 결과

그림 7은 시뮬레이션을 통해 보고자하는 내용이다. 이 운동은 곡선(원) 운동을 나타내고 $0 \leq t \leq 5$ 에서는 $(F_{hx}, F_{hy}) = (-1.2, -0.7)$ 인간이 준 힘이고 $5 < t \leq 10$ 에서는 $(F_{hx}, F_{hy}) = (-0.05, 0)$ 힘을 준다.

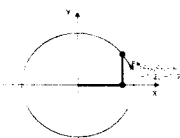


그림 7 : 곡선 운동(원 운동)

이때의 결과는 다음과 같다.

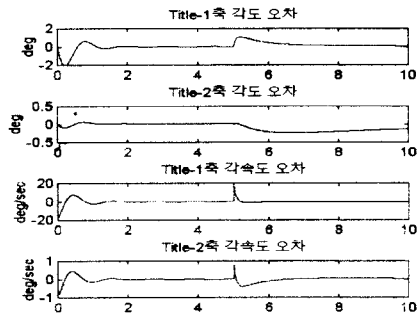


그림 8 : 곡선운동을 하다가 멈출 때의 오차

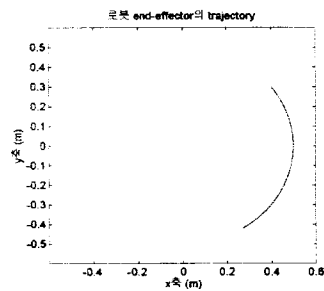


그림 9 : 곡선 운동을 하다가 멈출 때의 trajectory

5. 실험

5.1 실험 환경

전체 실험 장비는 그림 16과 같다.

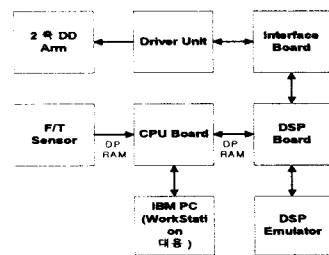


그림 10 : 전체 실험 장비

5.2 실험 파라미터 설정

파라미터 설정은 다음과 같다.

$K_{P1}=200$ $K_{P2}=85$ $K_{D1}=35$ $K_{D2}=3$ 이며 mode switching을 판단하는 F_{bound} 는 $5.7(N)$ 이고 $K_c = \begin{bmatrix} 300 & 0 \\ 0 & 300 \end{bmatrix}$ 이며, $N = \begin{bmatrix} 200 & 0 \\ 0 & 200 \end{bmatrix}$ 이다.

5.3 실험 결과

실험은 다음 각각의 2가지 경우에 대해서 한다. 첫 번

제는 인간이 시계 방향으로 원을 그리면서 운동하려고 할 경우이다. 이 때 사양은 $\dot{X}_{dmax}=0.45(m/s)$ $\dot{X}_{dmean}=0.15(m/s)F_{mean}=14.2(N)$ 로 설정한다(그림 11,12) 두 번째는 순간적으로 과도한 힘을 주다가 핸들을 놓을 경우에 대해서이다. 이 경우는 mode switching이 일어날 때 얼마나 안정적으로 시스템이 동작하는가를 보기 위함이다 이 때 사양은 첫 번째와 같이 $\dot{X}_{dmax}=0.45(m/s)$ $\dot{X}_{dmean}=0.15(m/s)$ $F_{mean}=14.2(N)$ 로 설정되어 있다(그림 13). 이 2가지의 실험에서 처음 5초 동안은 로봇의 joint angle이 $\theta_1=0^\circ$ 과 $\theta_2=0^\circ$ 에서 $\theta_1=0^\circ$ 과 $\theta_2=90^\circ$ 로 바뀐다. 먼저 첫 번째 실험 중 그림 12를 보면 인간의 의도(점선)를 로봇 끝단(실선)이 잘 추종함을 보였다.

그리고 그림 13의 두 번째 실험을 보면 인간이 준 힘이 첫 번째 실험에서 준 힘의 10배에 가까운 힘을 주다가 handle를 놓았을 때에 w가 매우 작은 값으로 떨어지므로 인간이 느끼는 안정성을 확보하여 주었으며 mode switching이 일어날 때에도 전체 시스템이 안정하게 동작하는 것을 보여 주었다.

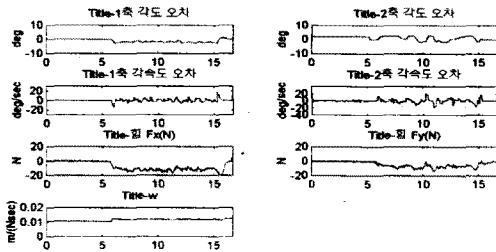


그림 11 : $\dot{X}_{dmax}=0.45(m/s)$, $\dot{X}_{dmean}=0.15(m/s)$ 일 때 인간이 준 힘, error 및 w 일 때 원 운동

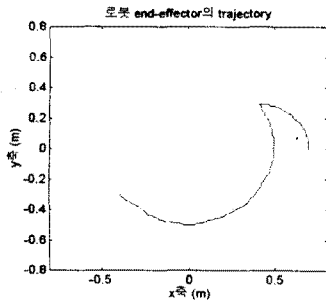


그림 12 : $\dot{X}_{dmax}=0.45(m/s)$, $\dot{X}_{dmean}=0.15(m/s)$ 일 때 trajectory

6. 결론 및 추후과제

본 논문에서는 로봇에게 알려지지 않은 불확실한 환경에서 로봇의 끝단을 초기 위치에서 원하는 위치까지 움직이게 하는 작업을 인간과 협조하여서 수행하게 하는 mode switching을 갖는 제어 방법을 제시하였다. 특히 인간과 로봇이 협조 작업을 하기 위해서 인간이 로봇의

작업 공간에 들어가서 작업을 수행하는데 꼭 필요한 인간의 느끼는 안전을 확보하는 방법을 제시하였고 시뮬레이션과 실험을 통해 검증하였다.

본 논문의 제안 점은 인간의 의도가 로봇을 원하는 위

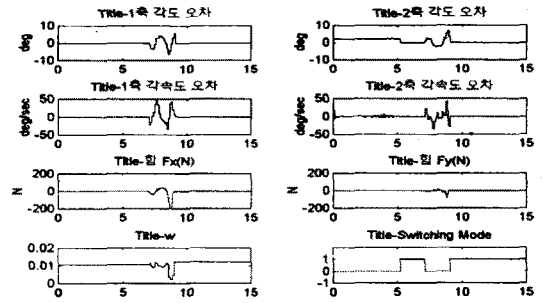


그림 13: $\dot{X}_{dmax}=0.45(m/s)$, $\dot{X}_{dmean}=0.15(m/s)$, $F_{mean}=14.2(N)$ 일 때 갑작스럽게 큰 힘을 주다가 핸들을 놓는 경우 - mode switching이 일어날 경우

치로 움직이기를 원할 때와 원하는 위치에 정지시키기를 원할 때로 나누어서 각각에 해당하는 제어구조를 설계하였다. 특히 인간이 로봇을 원하는 위치로 움직이게 하기를 원할 때에는 물리적으로 damping 상수의 역수에 해당하는 w를 이용하여 인간이 준 힘과 로봇이 움직이기를 원하는 속도와와 관계를 대응시켜 주는 방법을 사용하였고 이때 이 damping 상수의 역수에 해당하는 w를 사용하여 로봇 끝단의 조작성과 인간이 느끼는 안전을 확보는 방법을 제시하였다.

그리고 mode switching이 일어날 때에도 로봇이 안정하게 동작함을 실험을 통해 보임으로 로봇 전체의 안정성을 보였다.

하지만 본 실험에서는 2축 로봇을 사용하여 단지 평면 운동에서 로봇이 적절히 동작함을 보였기 때문에 6축 로봇에서도 동일한 동작을 시험에 보는 것이 중요하다. 그러기 위해서는 인간이 주는 힘 성분뿐만 아니라 모멘트 성분까지를 잘 분석하여 전체 시스템을 구성하는 것이 필요하다.

(참 고 문 헌)

- [1] A.K. Bejczy and Z.F. Szakaly "A harmonic motion generation(HMG) for telerobotic applications," Proc.1991 IEEE Int. Conf. on robotics and Automation, Sacramento, CA, April 9-11, 1991, pp.2032-2039
- [2] H. Kazerooni, "Human_robot Interaction via the Transfer of Power and Information Signals", IEEE Trans. on sys. man and cybernetic. Vol.20 no. 2 PP.450-463, March 1990
- [3] K. Kosuge, Y. Fujisawa, T. Fukuda, " Mechanical system control with man-machine-environment interactions", Proc. of IEEE Int. Conf. on robotics and Automation, Atlanta, GA, May 2-6, 1993, PP. 239-244
- [4] K. Kosuge, H. Yashida, D.Taguchi, and T.Fukuta, "robot-human collaboration for new robotic applications," Int. Conf. on robotics and Automation, 1994
- [5] 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.
- [6] M.S. Ben-Lamine, S.Shibata, K.Tanaka, A.Shimieu, "Mechanical impedance characteristics of robots for coexistence with humans," Int. Conf. on robotics and Automation, P.907-912
- [7] D.E. Whitney, "Force feedback control of manipulator fine motions," Trans. ASME, J. Dyn. Syst., Measure. and Cont., vol. 98, no. 2, pp.91-97, Jun. 1977
- [8] J.K. Salisbury, "Active stiffness control of manipulator in Cartesian coordinates," in Proc. IEEE 19th Conf. on Decision and Control, pp.95-1000,1980.