

## 혼합제어모드를 이용한 텔레오퍼레이션 작업용 지능형 마스터 컨트롤러

### An Intelligent Master Controller with Mixed Mode for Teleoperation

°이영우\*, 권동수\*\*

\*한국과학기술원 자동화및 설계공학과(Tel: 02-958-3457; Fax: 02-968-1638; E-mail: leeyw@robot.kaist.ac.kr

\*\*한국과학기술원 기계공학과(Tel: 02-958-3417; Fax: 02-968-1638; E-mail: kwon@robot.kaist.ac.kr

**Abstracts** Position and rate control modes are the two common modes for controlling remote manipulators with joysticks or hand controllers. Generally, position mode is easier for teleoperation than rate modes, when the manipulation work space is small or comparable to the human operator's control space. When the telemanipulator's work space is very large, human operator's control motion range must be large to allow telemanipulator's full range of motion resulting poor control resolution. One way to solve the poor resolution problem is to use indexing. However, rate mode can provide any higher degree of resolution without use of indexing. If two modes are mixed, master controller will be more convenient. The mixed mode algorithm, changes operating mode from position mode to rate mode or vice versa using fuzzy logic. The fuzzy logic algorithm, which has been designed to recognize the teleoperator's intended motion properly, provides an intelligence to a master controller.

**Keywords** Teleoperation, Master Controller, Mixed Mode, Fuzzy Logic

#### 1. 서론

처음 해개발이나 해폐기물 재처리 문제 등에 사용하기 위하여 미국에서 개발되기 시작한 텔레오퍼레이션(Teleoperation)은 현재 워자력뿐 아니라 심해, 우주공간 혹은 인간이 들어가기 힘든 극한 작업공간에서의 작업등에 사용할 수 있다는 점에서 점차 그 응용분야가 넓어져 가고 있다.[1,2,3,4] 텔레오퍼레이션의 작업은 인간이 직접 조작하는 부분인 마스터 컨트롤러(Master Controller)와 실제 작업을 하는 작업로봇(Slave Manipulator)영역으로 나누어 질 수 있다. 마스터 컨트롤러 제어 방법에서 가장 많이 사용되는 방법이 위치제어(Position Control)와 속도제어(Rate Control)방법이다. 그동안 이러한 위치제어법과 속도제어법에 대한 평가 및 비교실험등은 많이 행하여져 왔다.[5,6] 실제로 위치제어법은 마스터 컨트롤러와 작업로봇이 동일한 동작을 하게 되므로 동작인지력이 뛰어나 정밀한 작업시에 탁월한 성능을 발휘하나, 마스터 컨트롤러의 동작영역이 한정되어 있어서 동작영역보다 큰 작업을 행하기 위해서는 재초기화 방법(Index Key Method)등을 사용하여야 하므로 넓은 영역의 작업환경에서는 불편하다. 한편, 속도제어법은 넓은 영역의 이동은 편리하지만, 미세거리를 움직이거나 정밀작업이 어려워 정확한 위치제어를 하기 힘들다.[6] 현재 개발되어있는 각종 마스터컨트롤러는 위 두가지 방법을 선택적으로 사용하고

있어서 거리가동이 많고 정밀작업이 필요한 작업수행시에 사용자에게 매우 불편함을 느끼게 하였다. 그러므로 상황에 따라 이 두가지 방법을 적절히 자동전환, 또는 조합하여 작업로봇에 명령을 줄 수 있는 새로운 마스터 컨트롤러 알고리즘의 개발이 매우 필요하다. 그러므로, 본 연구에서는 기존의 위치제어법과 속도제어법을 비교 실험해 보고, 퍼지로직을 이용한 지능형 혼합제어 알고리즘의 제안과 함께 기존의 단일 제어법과의 비교 실험을 해 보았다.

#### 2. 위치제어법과 속도제어법의 비교

위치제어법과 속도제어법은 현재 조이스틱형의 마스터 컨트롤러를 이용한 텔레오퍼레이션에서 사용되는 가장 일반적인 방법이다. 여기서, 위치제어법은 조이스틱의 입력값이 작업로봇의 원하는 말단장치 위치(Desired End Effector Position)를 나타내고, 속도제어법에서는 조이스틱의 입력값이 작업로봇의 원하는 말단장치속도를 나타내게 된다. 이상적인 위치제어에서의 조이스틱 변위값과 실제 작업로봇의 말단장치위치와의 시스템 전달함수(Transfer Function)  $H(s)$ 은 각 좌표에 대해 상수이득(Constant Gain)을 가지게 되고, 속도제어에서의 전달함수는 각 좌표에 대해 적분기 형태를 가지게 된다.

$$H(s) = G_p \text{ 이상적인 위치제어인 경우} \quad (1)$$

$$H(s) = \frac{G_v}{s} \text{ 이상적인 속도제어인 경우} \quad (2)$$

식(1),(2)의 시스템에 대한 차분방정식(Difference Equations)은 아래와 같다.

$$y(n) = G_p u(n) \quad (3)$$

$$y(n) = y(n-1) + G_v T u(n-1) \quad (4)$$

여기에서  $u(n)$ 은 입력, 즉 마스터 컨트롤러의 변위,  $y(n)$ 은 출력, 즉 작업로봇의 변위, 그리고  $T$ 은 샘플링시간이다. 또한, 각각의 제어법에서 마스터컨트롤러의 초기위치에서의 떨림이 생기는 드리프트 문제(Drift Problem)방지를 위하여 5%-10%정도의 불감대(Dead Band)를 두고 있다.[3,6]

### 3. 3D 그래픽 시뮬레이터를 이용한 마스터컨트롤러

#### 3.1. 시스템의 구성 및 기본 개념

본 연구에서는 조종자의 제어 입력에 대한 작업로봇 시스템의 응답이 충분히 빠른 이상적인 경우를 가정하였다.[6] 전체 시스템은 (그림 1)에서와 같이 조종자의 제어입력값을 받기 위한 입력장치, 입력장치와 제어기 사이의 연결장치(Interface), 제어기, 그리고 실제 작업영역의 형상을 보여주는 그래픽 시뮬레이터로 구성될 수 있다.

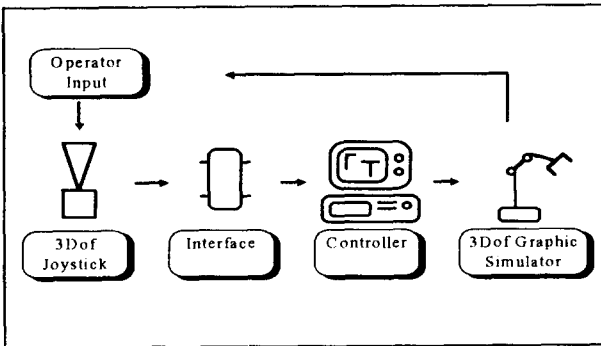


그림 1. 시스템 기본 구성도

Fig. 1. System Basic Composition

여기에서, 마스터 컨트롤러는 자체 제작한 3 자유도의 자기회귀방식(Self Centering)의 아날로그 타입 조이스틱을 이용하였다. 조이스틱의 마스터 컨트롤러의 입력값은 DAS-802 A/D를 이용하였고, 입력변위값에 사용되는 포텐시오메터는 선형(Linear Type)을 사용하였고, 포텐시오메터가 비선형특성을 가지므로, 프로그램 구동시 초기화과정(Calibration)을 첨가하였다. 그래픽 시뮬레이터 및 컨트롤러에는 IBM-PC 486 DX-66을 사용하였다. 그래픽 시뮬레이터는 2 차원 모니터상에서 3 차원을 나타내게 되므로, 작업위치(View-point)에 따라 작업의 인지력이

많이 차이가 나게 되므로, 사용자의 취향에 따라 작업위치를 자유롭게 전환할 수 있도록 하였다. 작업로봇은 가장 단순한 옵션이 없는 PUMA 타입의 3 자유도 직교형 로봇을 사용하였다.

#### 3.2 이상적인 위치제어와 속도제어에 대한 특성실험

앞에서 기술한 위치제어와 속도제어의 특성과 본 시스템에서의 특성을 비교, 평가하기 위하여 단순한 두 점 사이의 들어 옮기기 동작(Pick and Place Task)을 실험하였다.

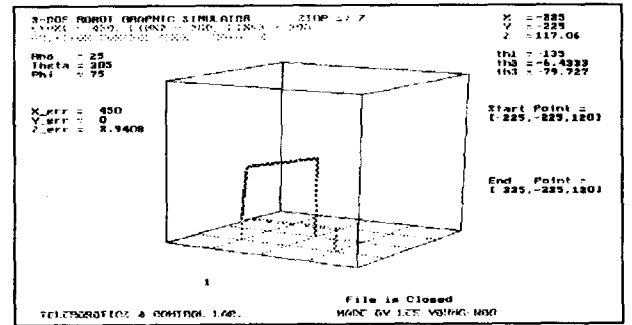


그림 2. 실험 1의 초기화면

Fig. 2. The initial scene of test-#1

(그림 2)에서 보는 것과 같이 말단장치의 기준좌표계에서의 (-225,-225,120)에서 (225,-225,120)까지의 두 점 사이의 동작을 실시하고, 그때의 조이스틱의 입력값의 변화와 말단장치의 좌표변화를 살펴보았다. 여기에서 이득값은 2로 하였다. (그림 3,4)는 위치제어법을 사용하였을 때를 보여 주고 있다. 위치제어법에서는 조이스틱의 변위계점에 도달하면 재초기화 방법(Index Key Method)을 이용하여 조이스틱의 초기점을 초기화하고 다시 동작시키는 모습을 보여주고 있다. 또한 (그림 5,6)에서와 같이 속도제어법에서는 평행이동동작은 상당히 자연스럽게 동작함을 보여 주고 있고, 위치제어법에 비하여 목표점 근방에 도달하는 시간은 월등히 빠르지만, 마지막 목표점에 도달해서는 정확한 동작을 하기가 무척 힘든 것을 보여주고 있다.

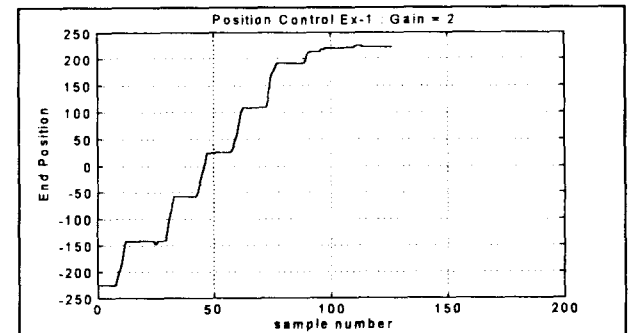


그림 3. 위치제어법에서 말단장치 좌표 변위값

Fig. 3. The variation of end position using position control

#### 4. 퍼지로직을 이용한 혼합제어 알고리즘

##### 4.1. 퍼지로직을 이용한 알고리즘 설계

앞에서 살펴본 바와 같이 위치제어와 속도제어는 각각의 상호상충되는 장단점을 가지고 있다. 그러므로, 두 제어법을 영역에 따라 혼합한 제어법을 이용한다면 상당히 좋은 성능향상을 이룰수 있을 것이다. 본 연구에서는 단순히 영역별로 전환되는 방법을 사용하였을시에 발생하는 전환점의 불연속성을 해소하고 각 모드의 이득값과 영역을 매스터 컨트롤러의 입력값과 입력값의 변화에 따라서 변화하도록 지능성을 부여하기 위하여 퍼지로직을 이용하였다. 본 연구에서는 여러 퍼지추론법중에서 실시간 처리를 위하여 연산량을 줄이기 위하여 각 입력변수의 소속함수는 삼각형이나, 평행사변형 형태만을 사용하였고, 퍼지규칙을 저장, 기술하는데 가장 많이 사용되는 FAM(Fuzzy Associative Memory) matrix 를 이용하였다. 또한, 역시 연산량을 줄이기 위하여 추론방식은 최소-최대법을 이용한 Sugeno 방식을 이용하였다[11,12] 퍼지제어규칙은 경험적 지식에 의존해서 IF-THEN 의 규칙의 퍼지조건명제 및 결론을 도출하였다. 전체시스템의 특성곡선 설계는 조이스틱의 중앙위치, 즉 초기위치부근의 넓은 영역은 위치제어모드가 되고, 이동이 필요한 가장자리영역에서는 속도제어모드가 나타나게 하였다. 여기서 퍼지시스템이 적용되는 부분이 속도제어모드가 나타나야 하는 영역을 결정해주는 것이다. 그러므로, 본 퍼지시스템의 출력값은 속도제어모드의 출력값이 된다. 입력변수로는 매스터 컨트롤러에서 들어오는 현재의 컨트롤러 위치값과 위치변화량을 이용하였다.

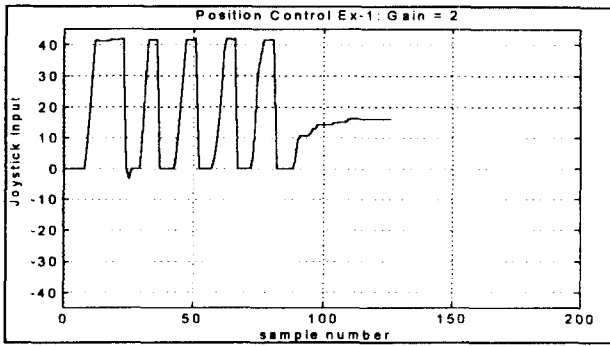


그림 4. 위치제어법에서 조이스틱 변위값

Fig 4. The variation of joystick input using position control

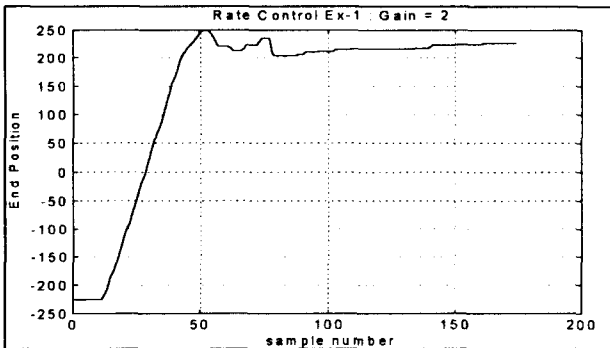


그림 5. 속도제어법에서 말단장치 좌표변위값

Fig 5. The variation of end position using rate control

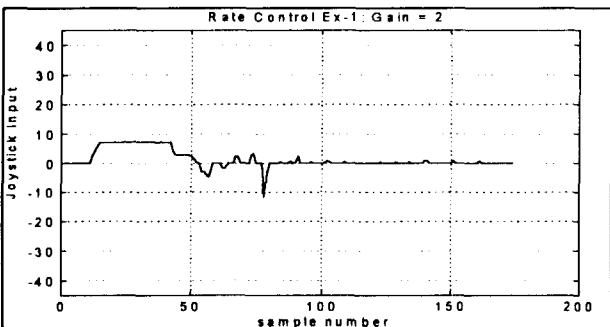


그림 6. 속도제어법에서 조이스틱 변위값

Fig 6. The variation of joystick input using rate control

즉, 한정된 영역의 미세한 동작에서는 위치제어법이 작업이행 능력이 뛰어나나, 넓은 영역의 동작시에는 재초기화 작업등의 동작이 필요해 불편함을 알 수 있다. 또한, 속도제어법은 정밀 동작은 조종기술의 숙련도가 무척 필요하지만, 변화폭이 적고 긴 이동거리를 가지는 동작에서는 재초기화 작업등이 불필요한 장점을 가지고 있다.

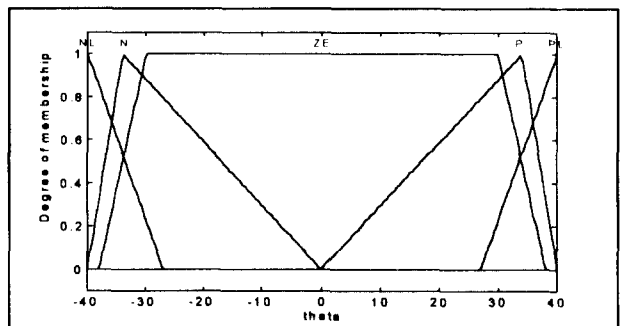


그림 7. 매스터 컨트롤러의 입력값에 따른 소속함수

Fig 7. The membership function of input value

초기의 zero 영역이 넓은 이유는 이 부분에 위치제어모드가 나타나기 때문에 넓은 불감대 영역을 가져야 하기 때문이다. 마찬가지로 매스터 컨트롤러의 입력값의 변화값도 5개영역으로 분할 하였다. 각 방향의 움직임으로 사용자의 작업의도를

파악하기 위해서는 방향이 중요하다. 즉, 양의 방향위치에 있을 때 많은 움직임은 위치제어모드보다는 속도제어모드 성향이 강하고, 작은 입력값은 위치제어 작업성향이 강할 것이다. 또한, 현재위치의 움직임과 다른 방향의 입력변화값은 정지작업 혹은 정밀작업이 필요한 위치제어모드 작업으로의 전환이 필요 할 것이다. 이를 위하여 각 방향 전체영역에 걸쳐 방향만을 표시해 주는 소속함수가 필요하다.

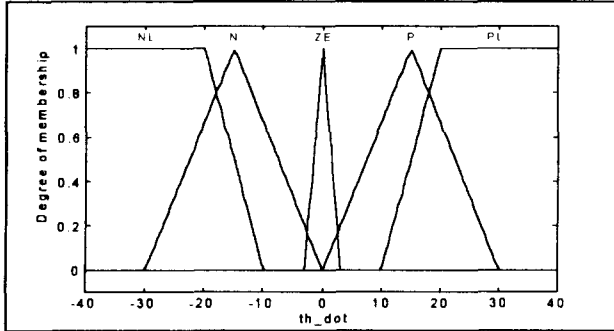


그림 8. 매스터 컨트롤러의 입력의 변화값에 따른 소속함수  
Fig 8. The membership function according to variation of input value

위에서 기술한 소속함수와 출력값과의 관계는 다음과 같이 구성하였다. 출력부분은 총 7 개의 상수값으로 기술하였는데, 여기서 계산된 값은 각 영역이 40 이라고 하였을 때 가장 안정적이라고 생각되는 속도들의 값으로 설정하였다.

표 1. 퍼지추론규칙

Table1. FAM Matrix

$\theta$	NL	N	ZE	P	PL
NL	NL.R	PO	PO	PR	PR
N	NL.R	PO	PO	PSR	PSR
ZE	NL.R	PO	PO	PO	PLR
P	NSR	NSR	PO	PO	PLR
PL	NR	NR	PO	PO	PLR

(NL.R : -15, NR : -12, NSR : -10, PO : 0, PSR : 10, PR : 12, PSR : 15)

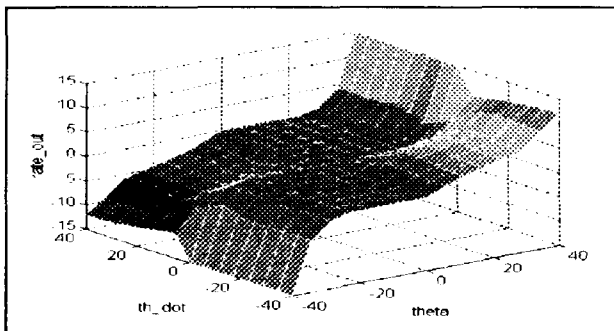


그림 9 퍼지추론 결과값

Fig 9. The output of fuzzy logic system

#### 4.2. 퍼지혼합제어알고리즘의 성능실험

제안된 혼합제어알고리즘의 성능실험을 위하여 실제 사용자가 각 제어알고리즘을 이용하여 로봇을 제어하였을 경우, 어느 정도의 작업시간과 정확도를 갖는지를 실험하였다. 실험방법은 정해진 시작점에서부터 정해진 경로를 통하여 중간 목표점을 정해진 에러율 범위안으로 거쳐가면서 최종 목표점까지 도달하였을때의 시간및 각 경로의 편위값의 제곱 평균을 구하였다. 실험대상은 각 제어알고리즘에 익숙한 두 그룹(A,B)과 전혀 각 제어 알고리즘에 익숙하지 않은 두 그룹(C,D)이 각각 10 번씩 3 번의 평균치를 각 주어진 실험을 했을 경우를 측정하였다. 각 그룹은 3 명으로 구성하였고, 단위는 작업이 행하여진 샘플의 갯수이고, 에러율은 로봇의 길이에 대응하는 공간의 좌표값으로써 주어진 작업경로와 실제의 로봇의 말단위치가 지나간 값의 편위의 제곱의 평균값이다.

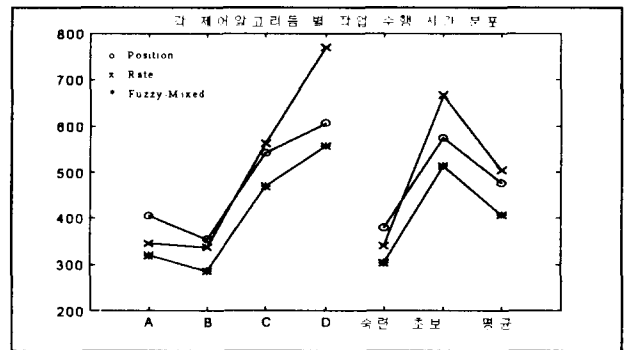


그림 10. 각 제어알고리즘 별 작업시간 분포도

Fig10. The distribution chart of working time

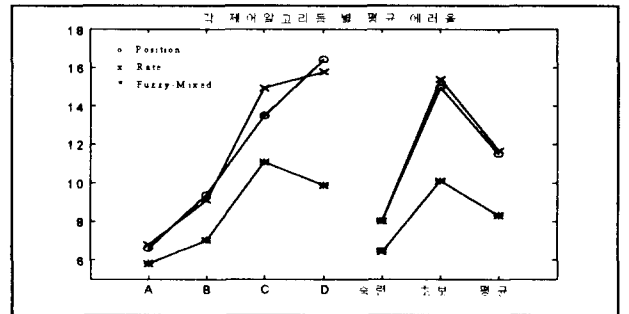


그림 11. 각 제어알고리즘별 평균 편위율

Fig11. The distribution chart of error

위 실험결과에서 위치제어가 속도제어보다 작업수행속도가 더 나음을 볼 수 있다. 이는 전체 이동시간은 속도제어법이 더 낫지만, 마지막 목표점으로의 정확한 이동하는데 정밀제어가 힘들었기 때문이다. 그렇기 때문에 초보자일때는 위치제어가 나은 성능을 보이지만, 숙련자일 경우에는 속도제어가 나은 성능을 보이는 것은 이 이유때문이다. 이러한 두 제어법이 장점을 살리고자한 혼합제어에서는 작업수행속도에서는 위치제어와 속도제어법에 비해 상대적으로 11.4%, 12.86%의 속도향상과

편위율에서도 27.94%, 29.13%의 성능향상을 보였다.

## 5. 결론

위치제어와 속도제어는 각각의 동작특성에 따라 장, 단점을 갖는 것을 볼 수 있다. 즉, 위치제어는 매스터 컨트롤러의 제한된 동작공간때문에 계속 재초기화하여 매스터 컨트롤러를 반복하여 움직여야 하는 불편함이 있고, 속도제어를 사용하면 미세한 거리를 움직이기 어려워 정확한 위치제어가 되지 않는다. 그럼에도 불구하고 현재 산업용 텔레로봇에 사용되는 매스터 컨트롤러는 이 두가지 제어법을 선택적으로 사용할 수 밖에 없어서 사용자에게 매우 불편하였다. 그러므로 상황에 따라 이 두 가지 모드를 적절히 자동 전환, 또한 조합하여 작업 로봇에 명령을 줄 수 있는 혼합제어 알고리즘을 본 연구에서 제시하였다. 퍼지논리를 이용하여 혼합제어법에 매스터 컨트롤러의 입력값과 입력변화값에 따라 각 제어모드영역의 변화 및, 속도제어에서의 기울기, 즉 이득값 가변등의 지능성을 부여하여 두 제어법의 장점을 살리고, 불연속점등의 문제를 해결하여 보았다. 특성실험 뿐만 아니라 동작실험에서의 작업수행시간, 경로의 편위율에서도 뛰어난 성능향상을 볼 수 있었다. 그러므로, 본 연구에서 제시한 혼합제어 알고리즘을 산업용 텔레로봇 뿐 아니라 증강비 분야 등에 적용하면 그동안 단일 모드만을 사용할 때 보다 사용자에게 더 큰 편리성을 부여 할 수 있을 것이다.

## 참고문헌

[1] Ray Goertz, "Manipulator Systems Development at ANL". *Proceeding of the 12th Conference on Remote Systems Technology*, ANS, Nov. 1964  
[2] K.V.Siva, P.J.Fisher, B.Hunter, P Elosegui and M.H.Brown, "Six-Axis Bilateral Input device for Telerobotic Applications", *Harwell Laboratory*  
[3] "Oak Ridge National Laboratory Robotics Technology Development Program", *Honeywell*, February 1992  
[4] Charles J.Herget, Erna L. Grasz, Roy D. Merrill, " Applications of Intelligent Telerobotic Control", *Third IFAC International Workshop on Artificial Intelligence in Real Time Control*, September 23-25, 1991  
[5] D.P.Millen, " An Evaluation of Resolved Motion Rate Control for Remote Manipulators", *Charles Stark Draper Lab.*, 1973  
[6] Won S. Kim, Frank Tendick, Stephen R. Ellis, Lawrence W. Stark, "A Comparison of Position and Rate Control for Telemanipulations with Consideration of Manipulator System Dynamics", *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. RA-3, No.5, October 1987  
[7] Lawrence Stark, Won S. Kim Frank Tendick, etc, "Telerobotics : Display, Control and Communication Problems", *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. RA-3, NP.1, February 1987

[8] Won S. Kim, Frank Tendick Lawrence W. Stark, "Visual Enhancements in Pick-and-Place Tasks : Human Operators Controlling a Simulated Cylindrical Manipulator", *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol RA-3, No.5, October 1987  
[9] Yoji Umetani, Kazuya Yoshida, "Resolved Motion Rate Control of Space Manipulators with generalized Jacobian Matrix", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol.5, No.3, June 1989  
[10] Michael Tisher, "PC Intern, System Programming". vol 1, pp625-633, *Abacus*, 1992  
[11] Stephen T. welstead, "Neural Network and Fuzzy Logic Application in C/C++", pp.395-421, *Wiley*, 1994  
[12] J.S.Roger Jang, "Fuzzy Logic Toolbox for use with MATLAB", *The MATHWORKS, Inc.* 1995  
[13] Branko Soucek and The IRIS Group, "Fuzzy, Holographic, and Parallel Intelligence", pp.93-124. *Wiley*, 1992