

위치 · 속도 제어 방식을 이용한 마스터 컨트롤러 지능형 혼합 제어 알고리즘 An Intelligent Mixed Mode Algorithm of a Master Controller using Position and Rate Mode

김기홍*, 권동수**

* 한국 과학 기술원 자동화 및 설계공학과 (Tel : 958-3457; Fax : 968-1638; E-mail : kimkh@robot.kaist.ac.kr)

** 한국 과학 기술원 기계공학과 (Tel : 042-869-3042; E-mail : kwon@automation.kaist.ac.kr)

Abstract : The control modes used in teleoperation are position control mode, and rate control mode. This paper presents the problems of the conventional control modes through simulation, proposes an intelligent mixed control mode that converts the operation mode between the position mode and the rate mode intelligently by judging the operator's intention using the real-time measurement data. The effectiveness of the proposed intelligent mixed control mode is demonstrated and compared to other typical control modes through simulation and actual experiment.

Keywords : Teleoperation, Intelligent mixed mode

1. 서론

지난 20 여년 동안 프로그래밍이 가능한 로봇들이 많은 응용 분야에서 사용되어져 왔다. 비록 이들 로봇 중 많은 것들이 컴퓨터에 의해서 제어되지만, 공장과 같이 정형화된 환경(structured environment)하에서는 로봇 지능에 대한 필요성이 크지 않았다. 그러나, 모델링이 어려운 정형화되지 않은 환경하에서는 로봇 자신이 예측할 수 없이 변하는 여러 조건을 감지하고, 그러한 조건 변화에 맞게 적절한 동작을 계획하고 실행할 수 있게 하기 위해 로봇에 지능을 부여하는 일이 요구되어 졌다. 하지만, 이러한 로봇 지능에 관한 연구는 아직까지 연구·개발 단계에 머물러 있는 것이 사실이다. 따라서, 작업자는 안전한 원격 위치에서 로봇을 지능적으로 제어하고 로봇은 인간에게 위험한 환경하에서 작업을 수행하는 원격 조종(teleoperation)에 대한 연구와 접근이 함께 이루어지고 있다[1,3]. 이런 원격 조종에 관한 연구와 접근이 이루어지면서 어떻게 하면 작업자와 작업 로봇간에 더 나은 인터페이스(interface)를 제공할 수 있을까 하는 것이 가장 중요한 문제로 부각되었다[2]. 따라서 최근에는 작업자와 로봇간의 더 나은 인터페이스를 제공하기 위해서 작업 공간에 대한 작업자의 인식 능력을 향상시키기 위한 각종 센서나 힘-반향 핸드 컨트롤러(force-reflecting hand controller), 그리고 작업자가 사용하기 편리한 기구학적 구조와 제어 알고리즘을 갖는 마스터(master) 컨트롤러 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나, 마스터 컨트롤러 제어 알고리즘에 대한 연구는 단순히 작업자가 상황에 따라 제어 모드를 전환시키는 방식이거나, 자동적으로 제어 모드가 전환되는 방식이라 하더라도 개선되어야 할 문제점이 많은 게 사실이다[4]. 따라서, 본 논문에서는 기존의 알고리즘이 가지고 있는 문제점과 그것의 해결책을 제시하고 그러한 해결책을 바탕으로 작업자의 의도하는 바를 지능적으로 판단하여 상황에 맞는 제어 방식을 선택하고 그것에 따라서 작업 로봇에 적절한 명령을 내릴 수 있는 새로운 마스터 컨트롤러 알고리즘을 제안하였다. 또한, 실 시스템에 적용하여 시뮬레이션만으로는 고려하기 어려운 다양한 동적 인자들(dynamic parameters) 영향하에서의 다양한 비교·평가 실험을 통해 제안된

알고리즘의 타당성을 검증하였다.

2. 기존의 원격 제어 방식

2-1. 위치 제어 방식

위치 제어 방식에서는 마스터 컨트롤러 입력 값이 작업 로봇 말단 장치의 원하는 위치를 나타낸다. 따라서, 마스터 컨트롤러 입력 u 와 로봇 말단 장치의 위치 x 사이의 특성 방정식과 전달 함수는 다음과 같다.

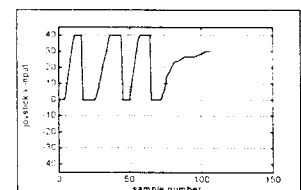
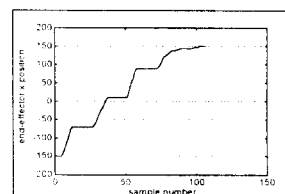
① 연속 시간 시스템의 경우

$$x(t) = G_p u(t) \quad , \quad H(s) = G_p \quad (1)$$

② 이산 시간 시스템의 경우

$$x(k) = G_p u(k) \quad , \quad H(z) = G_p \quad (2)$$

위치 제어 방식에서는 로봇 말단 장치의 움직임이 마스터 컨트롤러 입력과 유사한 특성을 보이므로 작업자에게 상당히 좋은 작업 인지력을 제공해 주는 장점이 있다[4, 5]. 따라서, 그림 1의 (a)에서 볼 수 있듯이 정밀한 위치 제어가 필요한 목표점 부근에서 상당히 빠르고 정확한 제어가 가능하다. 그러나, 넓은 동작 범위를 요구하는 작업에 있어서는 로봇 말단 장치를 멀리 이동시키기 위해 그림 1의 (b)에서 볼 수 있듯이 인덱스 키키를 이용하여 마스터 컨트롤러의 원점을 재초기화 해야 하는 번거로움이 있다.



(a) 로봇 말단 장치의 x축 궤적 (b) 마스터 컨트롤러 x축 입력
그림 1. 위치 제어 방식을 사용했을 경우

2-2. 속도 제어 방식

속도 제어 방식에서는 마스터 컨트롤러 입력 값이 작업 로봇 말단 장치의 원하는 속도를 나타낸다. 따라서, 마스터 컨트롤러 입력 u 와 로봇 말단 장치의 위치 x 사이의 특성 방정식과 전달 함수는 다음과 같다.

① 연속 시간 시스템의 경우

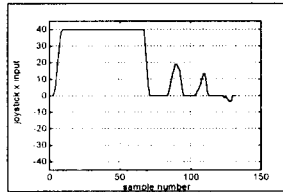
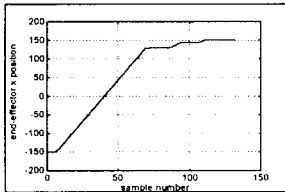
$$\frac{dx(t)}{dt} = G_v u(t) \quad , \quad H(s) = \frac{G}{s} \quad (3)$$

② 이산 시간 시스템의 경우(backward-difference method)

$$x(k) = x(k-1) + G_v T u(k) \quad , \quad H(z) = \frac{G_v T}{1-z^{-1}} \quad (4)$$

T : 샘플링 주기

그림 2의 (a)에서 볼 수 있듯이 속도 제어 방식은 적분기의 시간 지연 효과로 인한 동작 인지력 저하로 인해 목표점 부근에서 위치 제어 방식보다 좋지 못한 제어 성능을 보이게 된다. 반면에, 그림 2의 (b)에서 볼 수 있듯이 속도 제어 방식은 먼 거리 이동을 위해 위치 제어 방식과는 달리 인덱스 키를 이용한 원점 재초기화 작업이 필요 없는 장점을 가지고 있다. 또한, 로봇의 이동 속도가 느린 경우에는 대체로 위치 제어 방식보다 더 나은 성능을 보이며, 저역 통과 필터링 효과로 인해 작업자의 손 떨림이나 측정 잡음(measuring noise)과 같은 외란(disturbance)에 대해서 위치 제어 방식에 비해 상대적으로 강한 특성을 보인다[2].



(a) 로봇 말단 장치의 x 축 개적 (b) 마스터 컨트롤러 x 축 입력
그림 2. 속도 제어 방식을 사용했을 경우

2-3. 혼합 제어 방식

혼합 제어 방식은 위치 제어 방식과 속도 제어 방식의 장점을 결합하여 상황에 따라 제어 모드가 전환되는 방식이다. 이러한 특성을 얻기 위해 그림 3에서 볼 수 있듯이 마스터 컨트롤러 입력 값이 작은 영역에서는 위치 제어 방식이, 그리고 마스터 컨트롤러 입력 값이 큰 영역에서는 속도 제어 방식이 동작 모드로 설정되게 되어 있다. 그러나, 그림 3에서 볼 수 있듯이 제어 모드가 전환될 때 속도 제어 모드의 제어 입력 값으로 0이 들어가게 되어 로봇 말단 장치가 멈추었다가 다시 움직이기 시작하는 속도 불연속 동작을 보이게 된다. 또한 제어 모드 전환점이 고정되어 있어서 성능 향상에 한계가 있다.

속도 제어 영역에서는 그림 3에서 볼 수 있듯이 작업 로봇에 대한 작업자의 동작 인지력을 유지하기 위해 히스테리시스(hysteresis) 형태의 특성을 보인다[4, 5].

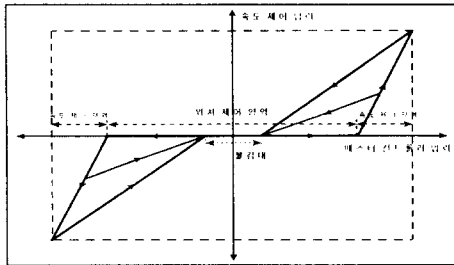


그림 3. 혼합 제어 방식에서 사용되는 속도 제어 모드의 특성 곡선

3. 제안된 지능형 혼합 제어 방식

3-1. 모드 전환시의 속도 불연속 문제 해결 방안

기존 혼합 제어 방식의 문제점인 모드 전환시의 로봇 말단 장치의 속도 불연속 문제는 모드 전환이 일어날 때 속도 제어 모드의 속도 지령인 $G_v u_{lim^*}$ 를 위치 제어 모드의

속도 지령인 $G_p \frac{du}{dt} \Big|_{u_{lim^*}}$ 와 같게 하면 해결된다. 즉,

$$G_p \frac{du}{dt} \Big|_{u_{lim^*}} = G_v u_{lim^*} \quad (5)$$

u : 마스터 컨트롤러 입력,

m : 모드 전환이 일어나는 마스터 컨트롤러 입력 u 의 값
식 5로부터 모드 전환점에서의 속도 제어 입력 c_{lim^*} 는 식 6과 같이 계산될 수 있다.

$$c_{lim^*} = \frac{G_p}{G_v} \frac{du}{dt} \Big|_{u_{lim^*}} \quad (6)$$

그림 4에서 볼 수 있듯이 속도 제어 영역에서 m^* 로부터 u_{max} 사이의 마스터 컨트롤러 입력을 c_{lim^*} 와 c_{max} 사이의 속도 제어 입력으로 맵핑하게 되면 속도 불연속 문제를 해결할 수 있다. 여기서 u_{max} 는 마스터 컨트롤러 입력 u 의 최대값이고, c 는 제어 입력이며, c_{max} 는 속도 제어 입력의 최대값이다.

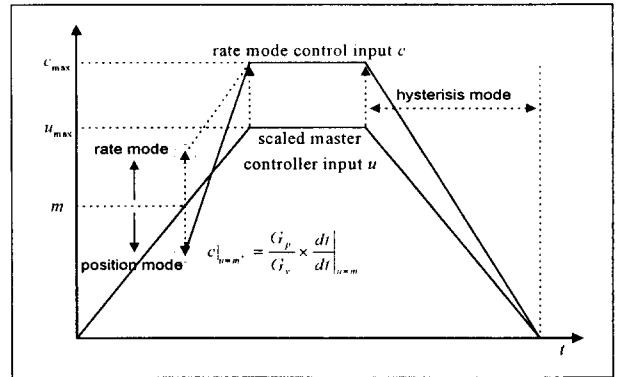


그림 4. 마스터 컨트롤러 입력 u 와 속도 제어 입력 c

3-2. 의도 변수 r

마스터 컨트롤러 각 축의 입력을 따로 처리하게 되면 고려해야 할 경우의 수가 많아지게 되어 계산 부하가 커지는 단점이 있게 된다. 따라서, 마스터 컨트롤러 입력을 통해서 드러나는 작업자의 의도를 가장 잘 나타내면서 고려해야 할 경우의 수를 크게 줄여 계산 부하를 상당량 감소 시킬 수 있는 직교 좌표상에서의 마스터 컨트롤러 입력 벡터의 크기(norm)를 의도 변수 r 로 정의하였다. 여기서 x, y, z 는 각각 마스터 컨트롤러 x, y, z 축 입력이다.

① 마스터 컨트롤러 입력이 x 의 1차원인 경우

$$r = |x| \quad (7)$$

제어 모드 전환점의 반경 $r_m = x_m$ 이다.

② 마스터 컨트롤러 입력이 x, y 의 2차원인 경우

식 8에서 보인 것과 같이 의도 변수 r 은 입력 공간상에 마스터 컨트롤러 입력이 형성하는 원의 반경을 나타낸다.

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (8)$$

제어 모드 전환점의 반경 $r_m = \sqrt{x_m^2 + y_m^2}$ 이다.

③ 매스터 컨트롤러 입력이 x, y, z 의 3 차원인 경우 식 9 와 그림 5 에서 볼 수 있듯이 의도 변수 r 은 입력 공간상에 매스터 컨트롤러 입력이 형성하는 구의 반경을 나타낸다.

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (9)$$

제어 모드 전환점의 반경 $r_m = \sqrt{x_m^2 + y_m^2 + z_m^2}$ 이다.

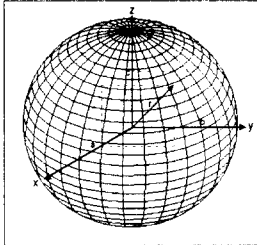


그림 5. 3 차원 매스터 컨트롤러 입력에 대한 의도 변수 r

3-3. r 과 Δr 에 의한 동작 모드 선택

작업자의 의도에 관한 정보는 r 과 Δr 로부터 파악이 가능하다. Δr 의 경우, 값이 클수록 속도 제어 성향이 크며 작을수록 위치 제어 성향이 크다. 따라서, Δr 값이 클수록 제어 모드 전환점의 반경 r_m 을 줄여서 속도 제어 영역을 넓히고, Δr 값이 작을수록 r_m 을 크게 하여 위치 제어 영역을 넓혀야 한다. 이렇게 작업자가 의도하는 동작 모드의 영역을 넓혀 줌으로써 작업을 보다 쉽고 편하게 할 수 있다. r 의 경우에도 값이 클수록 속도 제어 성향이 크며 작을수록 위치 제어 성향이 크다. 따라서, r 값이 큰 경우($r > r_m$)에는 속도 제어 모드가 동작 모드로 선택되고, r 값이 작은 경우($r < r_m$)에는 위치 제어 모드가 동작 모드로 선택되어야 한다. 이렇게 작업자가 의도하는 제어 모드가 동작 모드로 선택되게 함으로써 작업을 보다 능률적으로 수행할 수 있게 된다. 이러한 경험적 사실에 근거하여 작업자의 의도에 맞게 제어 모드 전환점이 변하고 동작 모드가 선택되게 하면 제어 모드 전환점이 고정되어 있는 기존의 혼합 제어 방식에 비해 더 나은 성능을 보이게 된다.

3-4. 지능적 모드 전환을 위한 퍼지 추론 시스템

본 논문에서는 지능적인 제어 모드 전환을 위해 퍼지 로직을 이용한 추론 시스템을 구성하였으며, 이 퍼지 추론 시스템의 입력 변수로는 정규화된(normalized) Δr 을 사용하였고 출력 변수로는 제어 모드 전환점의 반경 r_m 의 맵핑된 값인 $mapped\ r_m$ 이 추론 되게 하였다.

제어 모드 전환에 쓰일 모드 전환점의 반경 r_m 은 식 10을 이용하여 퍼지 추론된 $mapped\ r_m$ 을 r_m 의 최소값 $r_{m\ min}$ 과 최대값 $r_{m\ max}$ 사이로 맵핑함으로써 구할 수 있다.

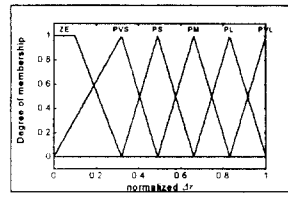
$$r_m = r_{m\ min} + mapped\ r_m (r_{m\ max} - r_{m\ min}) \quad (10)$$

implication method	aggregation method	defuzzification method
max-product	sum	COA(center of area)

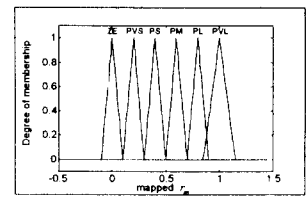
표 1. 퍼지 추론 시스템에서 사용된 각종 방법

normalized Δr	ZE	PVS	PS	PM	PL	PVL
mapped r_m	PVL	PL	PM	PS	PVS	ZE

표 2. 퍼지 추론 시스템의 if-then 규칙



(a) 입력 변수의 소속 함수



(b) 출력 변수의 소속 함수

그림 6. 퍼지 추론 시스템의 소속 함수

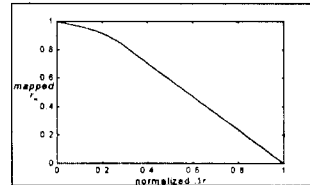
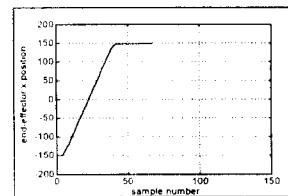


그림 7. 퍼지 추론 시스템의 출력 곡선

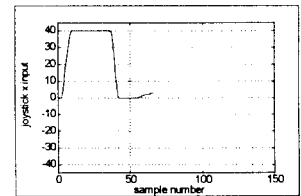
3-5. 시뮬레이션

제안된 지능형 혼합 제어 방식을 사용하면 그림 8의 (a)에서 볼 수 있듯이 기존 혼합 제어 방식의 문제점이었던 모드 전환점에서의 속도 불연속 문제가 발생하지 않는다. 또한, 작업자가 로봇 말단 장치를 빠르게 혹은 멀리 이동시키기 위해 매스터 컨트롤러를 빠르게 움직이는 경우 추론 되어진 제어 모드 전환점의 반경 r_m 이 작아지게 되어 그만큼 빠르게 속도 제어 모드로 전환되게 된다. 이럼으로써 작업자가 의도하는 빠르고 먼 로봇 말단 장치의 이동이 가능하게 된다.

사용되어진 위치 제어 영역과 속도 제어 영역의 이득 값은 모두 1.0이다. 그리고, $r_{m\ min}$ 과 $r_{m\ max}$ 는 각각 매스터 컨트롤러 입력 최대값의 50%와 80%되는 값으로 설정하였다. 또한, 속도 제어 입력의 최대값 $c_{max} = 150.0$ 으로 설정하였다.



(a) 로봇 말단 장치의 x 축 궤적



(b) 매스터 컨트롤러 x 축 입력

그림 8. 제안된 지능형 혼합 제어 방식을 사용했을 경우

4. 실험 및 결과

4-1. 실험 장치 구성

본 논문에서는 로봇의 실시간 제어를 가능하게 하기 위해 실시간 운영 체제인 VXWORKS 하에서 동작하는 VME(Versa Modular Eurocard) 시스템과 DSP 보드를 이용하여 제어기를 구성하였다. 사용자 인터페이스와 각종 제어 방식의 구현 그리고 로봇의 경로 생성은 CPU로 Motorola의 32MHz MC68040을 사용하는 KVME-040 CPU 보드가 담당하고, 매스터 컨트롤러와 엔코더, 홈-리미트 스위치등의 로봇의 여러

센서들을 포함하는 외부 장치와의 인터페이스 그리고 로봇 각 축의 서보 제어는 Texas Instruments의 TMS320C30 DSP chip을 장착한 DSP 보드가 담당하도록 시스템을 구성하였다. 이렇게 함으로써 하나의 보드가 모든 일을 담당할 때보다 연산 시간을 줄일 수 있어서 실시간 제어가 용이해지게 된다. 매스터 컨트롤러로는 각 축에 포텐셔미터(potentiometer)가 달려있는 Danfoss의 3 자유도 아날로그 조이스틱을, 그리고 작업 로봇으로는 4축 스카라(SCARA) 로봇을 이용하였다.

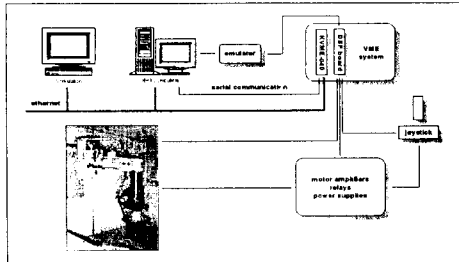


그림 9. 실험 시스템의 구성도

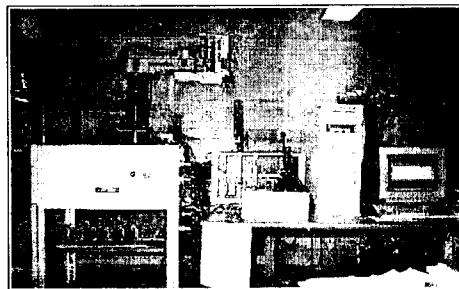


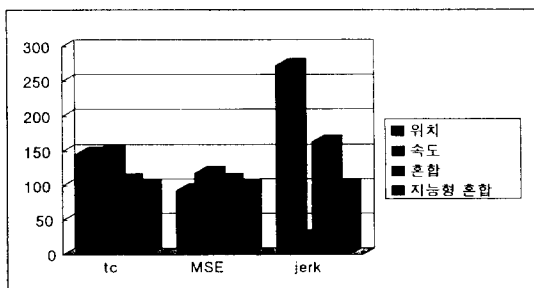
그림 10. 전체 실험 시스템

4.2. 실험 및 결과

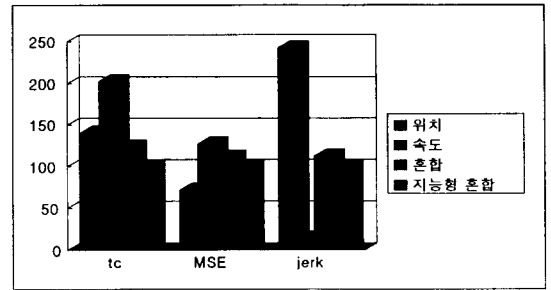
실험으로는 공간상의 좌표(-350, 300)과 (350, 500)이 형성하는 직선을 추종하는 작업을 수행하였다. (-350, 300)에서 출발하여 직선을 추종하며 목표점인 (350, 500)에 도달하도록 함으로써 원거리 이동과 추종 성능 그리고 정밀 위치 제어 성능등을 평가할 수 있다. 실험은 숙련자 그룹과 초보자 그룹으로 나눠 실시하였으며 성능 인자로는 작업 시간(completion time), 위치 오차 제곱의 평균(mean square error), 그리고 식 11에 보인 저크(jerk) 평균을 사용하였다.

$$\text{저크 평균} = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{(j_x^2 + j_y^2 + j_z^2)}}{n} \quad (11)$$

j_x, j_y, j_z : the jerk of x, y, and z at the i th sampling sequence



그래프 11. 숙련자 그룹의 실험 결과치(제한된 지능형 혼합 제어 방식을 사용했을 때의 성능 인자들의 값을 100으로 놓았을 때)



그래프 12. 초보자 그룹의 실험 결과치(제한된 지능형 혼합 제어 방식을 사용했을 때의 성능 인자들의 값을 100으로 놓았을 때)

5. 결론

본 논문에서는 기존 혼합 제어 방식의 문제점인 제어 모드 전환점에서의 속도 불연속 문제를 해결하고, 작업자의 의도 파악과 계산 부하를 감소시키기 위해 의도 변수 r 을 정의하였으며, 이것들을 바탕으로 퍼지 로직을 사용하여 작업자의 의도를 파악하고 그것에 따라 제어 모드가 적절히 전환되는 지능형 혼합 제어 방식을 제안하였다. 또한, 제한된 제어 방식을 시뮬레이션 뿐만 아니라 실제 시스템에도 적용하여 작업 시간, 추종 성능, 그리고 작업 시 로봇에 가해지는 충격 등과 같은 성능 인자들에 대해서 기존 제어 방식들과 비교·평가함으로써 그 타당성과 우수성을 입증하였다. 따라서, 원격 조종 작업 시 속도 불연속으로 인한 충격 문제가 없고 작업자의 의도 파악에 지능성이 부여된 제안된 제어 방식을 적용한다면 작업 성능이 크게 향상될 것이다. 특히 산업용 텔레 로봇 그리고 굴삭기, 크레인 등과 같은 중장비 분야에 적용하면 기존의 제어 방식을 사용할 때 보다 더 나은 사용자 편리성과 작업 성능 향상을 가져다 줄 것으로 기대된다.

본 연구는 한국 과학 기술 연구원(KIST) 기전 연구부 ROHY 팀의 장비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고 문헌

- [1]. Anu Rastogi, "Design of an Interface for Teleoperation in Unstructured Environments using Augmented Reality Displays", chapter 1
- [2]. Won S. Kim, Frank Tendick, Stephen R. Ellis, Lawrence W. Stark, "A Comparison of Position and Rate Control for Telem manipulations with Consideration of Manipulator System Dynamics", IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-3, No. 5, October 1987
- [3]. G. F. McLean, B. Prescott, and R. podhorodeski, "Teleoperated System Performance Evaluation", IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS, VOL. 24, NO. 5, MAY 1994
- [4]. 이영우, "혼합 제어 모드를 이용한 텔레오퍼레이션 작업용 지능형 매스터 컨트롤러", 한국 과학 기술원 자동화 및 설계공학과, 1996
- [5]. 이영우, "혼합 제어 모드를 이용한 텔레오퍼레이션 작업용 지능형 매스터 컨트롤러", KACC, VOL. 1, 1996