

자율적인 시각 센서 피드백 기능을 갖는 원격 로봇 시스템 교환 제어

Traded Control of Telerobot System with an Autonomous Visual Sensor Feedback

°김주곤*, 차동혁**, 조형석***, 김승호****

*한국과학기술원 기계공학과 (Tel: 042-869-3253; Fax:042-869-3210; E-mail: kjg@lca.kaist.ac.kr)

**삼성경영기술대학 (Tel: 0331-280-8110; Fax:0331-283-3127; E-mail: dhcha@samsung.cr.kr)

***한국과학기술원 기계공학과 (Tel: 042-869-3213; Fax:042-869-3210; E-mail: hscho@lca.kaist.ac.kr)

****한국원자력연구소 (Tel: 042-868-2928; Fax:042-868-8833; E-mail: shkim@nanum.kaeri.re.kr)

ABSTRACT: In teleoperating, as seeing the monitor screen obtained from a camera instituted in the working environment, human operator generally controls the slave arm. Because we can see only 2-D image in a monitor, human operator does not know the depth information and can not work with high accuracy. In this paper, we proposed a traded control method using an visual sensor for the purpose of solving this problem. We can control a teleoperation system with precision when we use the proposed algorithm. Not only a human operator command but also an autonomous visual sensor feedback command is given to a slave arm for the purpose of coincidence current image features and target image features. When the slave arm place in a distant place from the target position, human operator can know very well the difference between the desired image features and the current image features, but calculated visual sensor command have big errors. And when the slave arm is near the target position, the state of affairs is changed conversely. With this visual sensor feedback, human does not need coincide the detail difference between the desired image features and the current image features and proposed method can work with higher accuracy than other method without sensor feedback. The effectiveness of the proposed control method is verified through series of experiments.

Key Words: Image Feature, Traded Control, Visual Feedback, Eye-in-Hand Camera, Teleoperation

1 서론

최근에 환경 문제가 중요시 되고, 크게 문제화 되면서 방사선 피폭으로부터 작업자를 보호해야 한다는 여론도 분분하게 되었다. 그리고, 법적 피폭선량 규제치가 하향 조정 되었고, 고 방사선 피폭에 대한 작업 기피 현상도 나타났다. 이들로 인하여 증기 발생기 수실 내부에서의 작업 같은 고 방사선 지역에서 행해지고 있는 각종 작업의 자동화가 절실히 요구되고 있다. 따라서 인간을 대신한 원격 로봇 시스템을 사용하기 위해서 많은 연구가 진행되고 있다[1].

우리 나라에서도 원자력 발전소의 유지, 보수 및 해체 작업에 사용하기 위해서 원격 로봇 시스템에 대한 연구가 진행 중이다. 현재 원자력 발전소에서 발생할 수 있는 여러 가지 많은 작업들을 다음과 같이 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫째는 작업자가 마스터 암을 조작하여 슬레이브 암을 임의의 초기 위치에서 실제 작업 하기에 알맞은 위치까지 움직이는 작업이고, 둘째는 대상 물체와 접촉하여 실제 작업을 수행하는 작업이다. 첫째 작업에서는 접촉이 없어 접촉력이 발생하지 않아 힘 정보를 이용할 수 없고, 오직 시각 정보에만 의존하여 작업을 수행해야 한다. 그러나, 둘째 공정에서는 접촉력이 발생하여, 작업할 때 시각 정보 뿐만 아니라 힘 정보도 유용하게 사용할 수 있다. 전체 작업 공정에서 볼 때 첫째의 작업이 잘 이루어져야 둘째 작업을 수행하기가 용이하다. 첫째 작업 공정에서 작업자는 시각 정보만을 보고 마스터 암을

조작하여 슬레이브 암을 동작시켜 작업 공정을 수행해야 한다. 이 경우에는 대상 물체를 직접 보지 못하고, 화면을 통하여 보기 때문에 거리에 대한 감각이 부족할 뿐만 아니라 원하는 위치에서의 영상과 현재의 영상의 차이를 구별하기 어려운 경우가 많아서 작업하기 곤란하다.

최근에는 이런 어려움을 보완하기 위해 카메라를 통해 얻을 수 있는 영상을 입체 영상으로 만들어서 3차원 입체 영상을 작업자가 볼 수 있게 하는 방법의 연구가 진행되고 있고[2], 여러 대의 카메라를 설치하기 어려운 환경에서는 카메라를 움직이는 로봇 팔 끝에 부착하여 필요한 정보를 추출하는 연구가 진행되었다[3]. 이 중에서 시각 센서를 이용한 대표적인 연구 사례는 Sanderson 등이 참조 모델 적응 제어(model reference adaptive control) 방식을 채택하여 시각 서보에 적용한 연구[4], 대상 물체의 정확한 CAD 모델로부터 얻을 수 있는 정보를 영상 특징으로 하여 시각 서보 시스템을 구현한 연구[5][6], 증가된 영상 공간(Augmented Image Space)을 구현하는 연구[7], 교정되지 않은 카메라(uncalibrated camera)를 사용한 시각 서보에 관한 연구[8], 정규화 특징 행렬(normalized feature matrix)을 구하는 연구[9], 시각 센서로 초기 충격힘을 줄이는데 사용한 연구[10] 등이 있다.

본 연구는 시각 힘 피드백 기능을 가진 원격 로봇 시스템과 이 시스템의 제어 알고리즘을 제안하였다. 여기서 시각 힘 피드백이란 작업자가 마스터 암에 힘을 전달시켜 마스터 암을 움직이면 슬레이브 암이 이를 따라 움직이듯이 슬레이브 암에 부착된 시각 센서에서 얻은 정보를 이용하여 작업자가 힘을 주어 슬레이브 암을 조정하듯이 슬레이브 암을 움직이는 것을 말한다.

이 제어 방법은 작업 환경에 설치되어 있는 카메라로부터 얻은 영상을 보고 작업자가 매스터 암을 조작하여 슬레이브 암에 명령을 주는 원격 조작 루틴과 시각 힘 피드백으로 슬레이브 암을 스스로 작동시키는 루틴으로 구성된다. 제안된 제어 방법은 실시간에서 동작하며, 시각 센서 뿐만 아니라 다른 어떤 센서를 부착한 원격 시스템에도 쉽게 적용하여 작업자의 작업 능력을 향상시킬 수 있다. 제안된 제어 방법의 특징을 살펴보기 위해서 실험실에서 제작한 원격 로봇 시스템을 이용한 일련의 실험을 행하였다.

2 시각 센서 피드백 기능을 갖는 원격 로봇 시스템의 구성

그림 1은 본 연구실(LCA in KAIST)에서 개발한 시각 센서 피드백 기능을 가진 원격 로봇 시스템을 보여 준다. 이 시스템은 크게 매스터 암, 슬레이브 암, CCD 카메라와 비전 시스템, 그리고 원격 시스템 제어기로 구성되었다. 매스터 암은 3자유도의 수직 다관절 구조를 가지며 각 축에는 직류 서보 모터가 부착되어 양방향 제어가 가능하게 만들었다. 마찰력을 줄이기 위해 각 모터의 축은 매스터 암의 각 축과 직결되었으며 동작성을 좋게 하기 위해서 중력이 작용하는 2, 3축에는 균형 질량을 부착하였다. 슬레이브 암은 6축 수직 다관절 구조를 가진 산업용 로봇(삼성 전자, FARA A1-U)를 개조하여 사용하였고, 슬레이브 암 제어기로 JPC(Joint Position Control) 보드를 사용하여 각 축을 16msec의 샘플링 시간으로 제어하도록 하였다[11]. 슬레이브 암의 손끝에 CCD카메라를 부착하여 시각 센서의 역할을 하게 하였다. 비전 보드(삼성 전자, MVB-02)는 DSP를 포함하고 있는 것을 사용하여 중앙 제어기와는 별도로 영상 처리 루틴을 수행하도록 하였다.

작업은 크게 두 단계로 나누어진다. 첫번째 단계는 작업자가 매스터 암을 조작하여 원격 조작 작업 명령을 내린다. 슬레이브 암은 그 작업 지령에 따라서 움직이며 작업을 수행한다. 슬레이브 암에 부착된 CCD 카메라에서 대상 작업 물체가 포착되고, 또 영상에서 대상 물체만을 구분할 수 있을 때부터는 두 번째 단계의 운동이 시작된다. 즉, 중앙 제어기에서 스스로 카메라 영상에서 영상 특징을 계산한다. 이것을 원하는 영상 특징과 비교하여 영상 특징 오차를 구하고, 그 영상 특징 오차로부터 다음 단계에 로봇이 움직여야 하는 거리를 구한다. 슬레이브 암은 작업자가 매스터 암을 통하여 명령을 주지 않고, 시각 힘 피드백 제어에 의해서 영상 특징 오차가 감소시키는 방향으로 계속적으로 움직이게 되어 원하는 영상과 일치시킨다.

그 외에 원격 로봇의 전체 작업 상황을 모니터링하기 위해 1대의 CCTV카메라가 작업장 내에 설치 되었으며 전체 작업 광경은 TV Monitor를 통해서 작업자에게 전달된다.

3. 시각 힘 피드백을 이용한 교환 제어

3.1 개요

시각 힘 피드백을 기능을 가진 원격 로봇 시스템이란 매스터 암의 조정으로 슬레이브 암으로 조작할 뿐만 아니라, 시각 힘 피드백을 통하여서도 슬레이브 암을 조작할 수도 있는 원격 로봇 시스템을 말한다. 이런 시스템의 제어 방법으로 교환 제어(traded control) 방법을 주장하였으며, 다음 절에 설명하였다.

이 절에서는 교환 제어(traded control)를 설명하기 이전에 이 제어 방법에 중요한 영향을 미치는 요소인 전체 영상 특징 오차를 다음과 같이 정의하였다.

$$V_{TE} = \sqrt{(V_{1, err}^2 + V_{2, err}^2 + \dots + V_{n, err}^2)} \quad (1)$$

이 값은 각각의 영상 특징들의 제곱의 양의 제곱근에 해당하며, 영상 특징 오차 공간에서 원점(원하는 영상 특징 오차)과 현재 지점(현재의 영상 특징 오차)과의 거리를 의미한다. 즉 이 값의 크기가 크면 원하는 위치와 거리가 멀고, 가까우면 가까울수록 원하는 위치와의 거리가 가까워진다는 것이다. 즉 이 값이 0일 때에 우리가 원하는 영상 특징을 얻게 되고, 그 위치가 원하는 위치다.

전체 영상 특징 오차는 교환 제어에서 인간의 명령에 의한 제어에서 시각 힘 피드백에 의한 제어로 바뀌게 되는 기준이 된다.

3.2 교환 제어(traded control)

교환 제어는 각각의 위치에서 측정된 전체 영상 특징 오차가 미리 정의한 경계치(threshold value) 값보다 크면 매스터 암 조작의 의해서 슬레이브 암에 작업 명령을 주게 되고, 경계치 값보다 같거나 작으면 시각 힘 피드백 명령의 의해서 슬레이브 암에 작업 명령을 주는 제어 방법이다.

그림 2에 교환 제어 방법의 블록 선도를 나타내었다. 이 제어 방식의 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{if } V_{TE} > C_{TV} \text{ then } \Delta X_R &= \Delta X_M \\ \text{else if } V_{TE} \leq C_{TV} \text{ then } \Delta X_R &= \Delta X_V \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, V_{TE} 는 현재의 위치에서 구한 전체 영상 특징 오차의 크기이고, C_{TV} 는 매스터 암의 조정에서, 시각 힘 피드백을 이용한 슬레이브 암의 작업으로 바뀌게 하는 경계치(threshold value)이고, ΔX_R , ΔX_M , ΔX_V 는 각각 혼합한 슬레이브 암의 기존 입력, 매스터 암을 통해 주는 인간의 명령, 그리고 시각 힘 피드백 명령을 나타낸다.

이 블록 선도에서 영상 특징 오차에서 슬레이브 암의 움직임은 자동 조정 퍼지룰을 이용한 방법을 사용하였다[12, 13].

이 제어 방식은 작업자가 숙련되지 않는 초보자인 경우에 대해서는 경계치를 크게 하여 오차가 비교적 큰 범위부터 시각 힘 제어를 하게 함으로써 작업 시간은 많이 걸리게 되지만, 작업자가 작업하기 편리하게 할 수 있고, 또 작업자가 숙련된 전문가인 경우에는 경계치를 작게 하여 원하는 작업 위치와 최대한 가까운 위치까지 매스터 암을 통한 작업을 수행할 수 있게 되어 작업도 비교적 편리하게 할 수 있고, 작업 시간도 줄일 수 있는 제어 방법이다.

4. 실험

4.1 실험 조건 및 절차

실험에서 기준이 되는 좌표계, 초기 위치의 영상과 최종 위치의 영상은 그림 3에 나타내었다. 매스터 암과 슬레이브 암의 운동은 각각 공간 상에서 세 방향의 평행운동(x, y, z)만을 한다. 그리고

대상 물체의 윗면의 수직 방향과 카메라의 방향은 미리 일치되어 있다.

실험에서 측정된 슬레이브 암의 좌표는 슬레이브 암의 직류 모터에 부착된 엔코더 값을 토대로 구한 것이고, 대상 물체의 중심은 영상에서 나타난 대상 물체의 픽셀 면적의 중심을 구하였고, 대상 물체의 픽셀 면적을 계산하여 영상 특징으로 사용하였다. 그 외의 실험 조건은 표1에 나타내었다.

여기서, 실험은 원격 작업에서 흔히 사용되고, 원자력 발전소 내에서 벽에 위치한 버튼의 중심을 누르는 작업이나 또는 나사 머리 중심과 볼팅물의 중심을 맞추는 작업을 대표할 수 있는 간단한 실험인 대상 물체의 중심을 맞추는 작업을 실험으로 하였다. 그리고, 실험 절차는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 원하는 영상을 얻을 수 있는 위치에 대상 물체를 두고 원하는 영상을 얻는다.

- 원하는 영상을 작업자가 작업 도중 현재 영상과 비교하여 볼 수 있게 모니터에 오버레이(Overlay)시킨다.

- 모니터 화면을 보면서 매스터 암을 조정하여 현재의 영상과 원하는 영상을 맞춘다.

- 현재의 영상이 원하는 영상(desired feature)과 일치되었다고 판단되면 실험을 끝낸다.

4.2 교환 제어

그림 4에 실험 동안에 카메라가 움직인 경로를 나타내었다. 초기에는 작업자가 원격 조작으로 슬레이브 암을 제어하기 때문에 최적의 경로로 가지 않고 작업자가 명령을 주는 위치에 따라서 움직인다. 그렇지만 빠른 오차의 감소를 볼 수 있다. 전체 영상 특징이 17이하의 값에서는 자율적인 시각 힘 피드백 제어에 의해서 슬레이브 암이 제어된다. 즉, 작업자의 원격 지령을 받지 않는 장점은 있지만, 영상 처리 시스템에 의한 결과로 움직이기 때문에 움직이는 속도가 느릴 수 있다.

그림 5에 작업 시간의 변화에 따른 영상 특징 오차들의 변화를 백분율로 나타내었다. 이 그림에서 1.4 초까지는 아주 급격하게 영상 특징 오차들이 감소를 한다. 이것은 작업자의 원격 조작의 특징이다. 그리고 1.4초 이후에는 아주 천천히 움직이는 것을 볼 수 있는데, 이것은 시각 힘 피드백 제어의 특징이다. 그 외에 영상 특징 3의 오차가 반복적으로 증감하는 현상을 보이는 이유는 영상 특징 면적을 측정하는데 있어 측정 오차가 나기 때문이다.

5. 결론 및 추후 과제

원격 작업은 작업자가 화면을 보면서 매스터 암을 원격 조작하여 슬레이브 암을 제어하는 것이다. 원격 작업 시에 작업자가 모니터의 화면상에 나타난 미세 오차를 잘 구별할 수 없기 때문에 슬레이브 암의 끝을 대상 물체의 중심점에 맞추거나, 볼팅(bolting) 작업 시에 나사 머리 중심과 볼팅 물의 중심을 맞추거나, 또는 바닥과 일정한 거리를 유지시키는 매우 어렵다. 본 연구에서는 이런 어려움을 해결하기 위해서 시각 힘 피드백 기능을 갖는 원격 시스템을 제안하였고, 그 시스템의 제어 방법으로 교환 제어 방법을 제시하였다. 이 분할 제어 방법은 매스터 암을 통한 원격 조작 방법과 시각 힘 피드백 제어 방법의 장점을 살리는 제어 방법으로 인간의 우수한 물체 구별력과 센서의 정확성을 모두 살릴 수 있는 제어 방법이다. 본 연구에서 보다 좋은 결과를 얻기 위해서는 매스터 암의 원격 조작 제어와 시각 힘

피드백 제어를 작업 요건에 맞추어 잘 융합시켜야 하고, 영상 처리 시간이 더욱 빠르도록 하드 웨어 개발도 필요하다. 더욱 정밀한 제어를 위해서는 다른 여러 가지 센서를 융합하는 방법에 대한 연구도 필요하다. 그리고, 작업자의 작업성을 좋게 하고 작업을 편리하게 하기 위해서 이를 센서 등에서 얻은 정보를 작업자에게 반영해 주는 연구도 필요하다. 이런 연구는 가상 현실(virtual reality) 분야에도 응용될 수 있다.

후기

이 논문은 1994년도 한국원자력연구소의 프로젝트 (KAERI/CM-018/95) 연구비 지원으로 수행되었습니다. 이에 관계 제위께 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] Pennington, J. E., "Space telerobotics: a few more hurdles", Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp813-816, 1986.
- [2] Sukhan Lee, " Intelligent Sensing and Control for Advanced Teleoperation ", Proc. IEEE Int. Sym. on Intelligent Control, pp19-28, June, 1993.
- [3] Iiasegawa, Suehiro, Ogasawara, " An Integrated Tele-Robotics System With a Geometric Environment Model and Manipulation Skills ", IEEE Internatinal Workshop on Intelligent Robots and Systems, pp335-341.1990.
- [4] Lee E. Weiss, Arthur C. Sanderson and Charles P. Nerman, " Dynamic Sensor-Based Control of Robot with Visual Feedback", IEEE Journal of Robotics and Automation, vol. RA-3, NO.5, pp. 404-417, Oct. 1987.
- [5] Feddema, John T., C. S. G. Lee, and O. R. Mitchell, " Automatic Selection of Image Features for Visual Servoing of a Robot Manipulator," IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 832-837, May. 1989.
- [6] Feddema, John T. and O. R. Mitchell, "Vision-Guided Servoing with Feature-Based Trajectory Generation," IEEE Tr. on Robotics and Automation, vol. no.5, pp. 691-700, Oct. 1989.
- [7] Jang, W., K. J. Kim, M. J. Chung, Z. Bien, "Concepts of Augmented Image Space and Transformed Feature Space for Efficient Visual Servoing of an Eye-In-Hand robot," accepted for publication in ROBOTICA.
- [8] B. H. Yoshimi and P. K. Allen, "Active, Uncalibrated Visual Servoing". Proc. 1994 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 156-161, IEEE, May. 1994.
- [9] 장 원, "영상특징을 이용한 로봇의 시각적 구동 방법", Ph. D dissertation, KAIST, 1991.
- [10] Bradley J. Nelson, J. Daniel Morrow, and Pradeep K. Khosla, "Improved Force Control Through Visual Servoing", Proceedings

of the American Control Conference, Seattle, Washington June, 1995.

[11] Kim, S. K., and Hwang, C. Y., "Robot controller with 32-bit DSP chip", *Korean Automatic Control Conference*, pp292-298,1991.

[12] 김 주관, "자동 조정 퍼지 논리를 이용한 슬레이브 암의 시각 서보 기법", 석사 논문, 한국과학기술원, 1995.

[13] M. Mizumoto, "Realization of PID Controls by Fuzzy Control Methods", *Proc. of IEEE*, pp. 709-715, 1992

Table 1. The conditions of experiments

Items	Value
Area of target object (unit: mm ²)	640
Focal length(unit: mm)	12

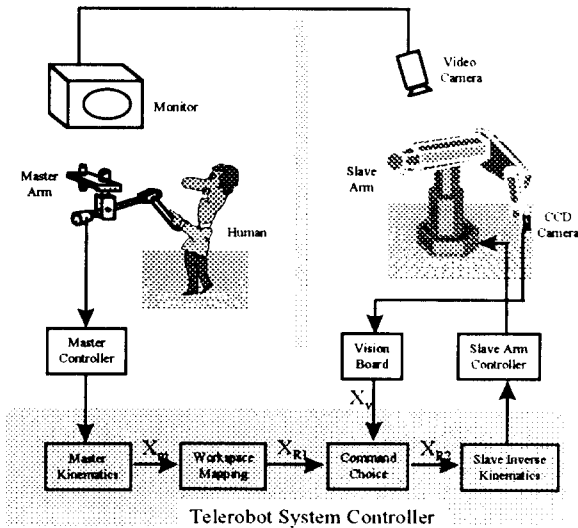


Fig. 1 The structure of the LCA telerobot system with visual sensor feedback (LCA: Laboratory for Control systems and Automation)

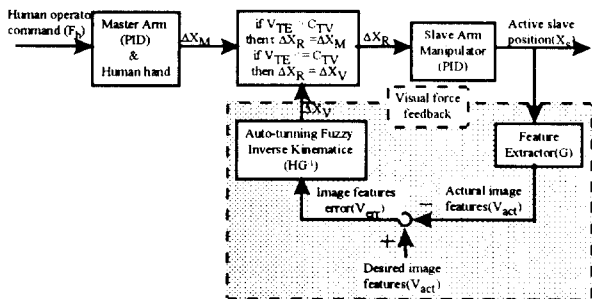


Fig. 2 The block diagram of traded control with the visual force feedback in teleoperation

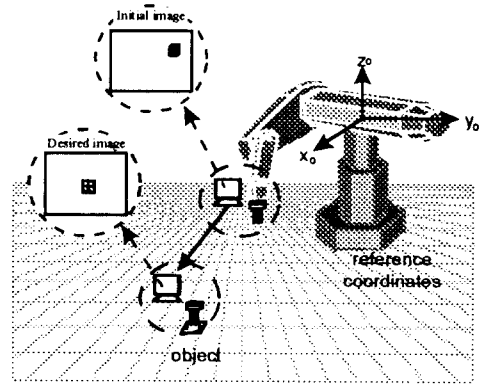


Fig. 3 The initial point and final point of the slave arm

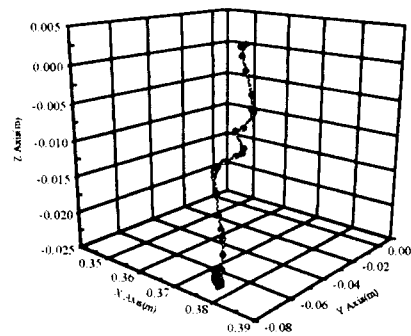


Fig. 4 The change of x, y, z path in using the traded control method

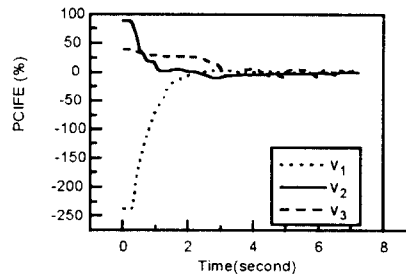


Fig. 5 The percent change of image feature errors(PCIFE) in using the traded control method