

# 마이크로 조립시스템의 원격제어

김덕호\* · 김경환\* · 김근영\* · 박종오\*\*

## A Dexterous Teleoperation System for Micro Parts Handling

Deok-Ho Kim, Kyunghwan Kim, Keun-Young Kim, and Jong-Oh Park

**Key Words :** Micro Teleoperation(마이크로 원격조종), Haptic Interface(햅틱 인터페이스), Micro Vision(마이크로 비전), Micro Gripper(마이크로 그리퍼), Object Handling(물체 조작)

### Abstract

Operators suffer much difficulty in manipulating micro/nano-sized objects without the assistance of human interfaces, due to the scaling effects in micro/nano world. This paper presents a micro manipulation system based on the teleoperation techniques which enables the operators to manipulate the objects with ease by transferring both human motion and manipulation skill to a micromanipulator. An experimental setup consisting of a micromanipulator operated under stereo-microscope with the help of intelligent user interface provides a tool that can be used to visualize and manipulate micro-sized 3D objects in a controlled manner. The key features of a micro manipulation system and control strategies using teleoperation techniques for handling micro objects are presented. Experimental results demonstrate the feasibility of this system in precisely controlling trapping and manipulation of micro objects based on teleoperation techniques.

### 1. 서 론

위험환경, 우주, 심해 안에서 로봇을 조작하기 위한 응용으로 활용되던 원격조종 로봇시스템은 최근 그 적용범위를 마이크로/나노 세계로 확대해 가고 있다. 인간은 직접 마이크로/나노 스케일 세계에서 센싱하고 조작할 수 없기 때문에 매크로(macro)와 마이크로/나노 세계사이에서 원격조종이 하나의 해결책으로 제시되고 있다. 현재까지의 마이크로 시스템에 대한 연구는 마이크로 구동기와 마이크로 센서 등 MEMS 기술을 이용한 단위 부품의 개발에 국한되어 있으나 앞으로의 마이크로 제품은 복잡한 기하학적 구조와 상이한 물질들의 조합이 필요하다. 복잡한 구조의 마이크로 제품을 제작하기 위해서는 마이크로 영역에서 작업할 수 있도록 인간의 매니플레이션 기술이 요구되며, 인간 작업자 손 끝의 운동 및 힘을 수천 분의 1 내지 수만 분의 1로 축소함으로써 서브 미크론 이

하 정밀도의 조립 작업이나 세포 구조물 조작이 가능하다.

마이크로 조립시스템의 원격조종은 마이크로 세계와 조종자를 연결시켜 주는 중요한 Interface로서, 작업자의 조립 skill을 효과적으로 조립셀에 전달하여 주는 동시에, 조립에 필요한 다양한 센싱 정보(위치, 힘, 비전)를 작업자에게 되돌려 준다. 본 연구에서는 인간 조작자가 마이크로 세계에서의 작업, 예를 들어 조립작업, 생산작업 등을 편안하게 수행할 수 있는 마이크로 조립을 위한 원격제어 시스템을 구축하였다. 또한, 마이크로 조립을 위한 매니플레이터의 원격 제어법을 제안하고 마이크로 대상체의 한 예로 Optical Fiber의 파지작업, 원하는 위치에 이송하는 작업을 수행함을 통해 구성된 시스템의 효과성을 검증하였다.

각 장의 구성은 다음과 같다. 2 장에서는 3 차원 마이크로 조립을 위한 마이크로 원격조종 시스템의 구성 및 특징에 대해 기술하였다. 3 장에서는 slave 로봇인 마이크로 그리퍼의 제어에 관해 기술하였으며, 4 장에서는 Haptic 인터페이스를 이용한 마이크로 원격제어 관해 기술하였다. 5 장에서는

\* KIST 마이크로시스템 센터

\*\* 지능형 마이크로시스템 사업단

약 100 um 직경의 optical fiber 를 대상으로 원격제어를 통한 매니플레이션 실험결과에 대해 기술하였다.

## 2. 마이크로 매니플레이션 시스템

### 2.1 시스템 구성 및 특징

본 연구에서는 3 차원 형상의 마이크로 부품의 조립이 가능한 마이크로 원격조종 시스템의 구축을 목표로 한다. 그림 1 은 KIST 마이크로 원격조종 시스템의 구성도를 나타낸다. 마이크로 조립을 위한 원격조종 시스템의 설계 개념은 다음과 같다.

1) 작업자의 조립 skill 을 추출할 수 있는 Haptic Interface

조립을 위한 마이크로 매니플레이터의 제어를 위해 작업자의 매니플레이션 skill 을 추출할 수 있는 다자유도 dexterous Haptic 인터페이스를 구현하고, Haptic 기구를 실시간 제어할 수 있는 제어기 구조를 지닌다.

2) 3 차원 마이크로 부품의 조립이 가능한 Visual Interface

3 차원 마이크로 부품 및 생체 구조물의 인식력이 우수한 스테레오 마이크로 비전을 이용하여 depth-of-field 사양이 일반 광학현미경을 통한 비전보다 약 10~20 배 정도 우수하도록 한다. 또한 마이크로 비전의 제약성을 극복하기 위해 multiple view, 다양한 field-of-view 의 선정이 가능한 마이크로 비전 시스템을 구축한다.

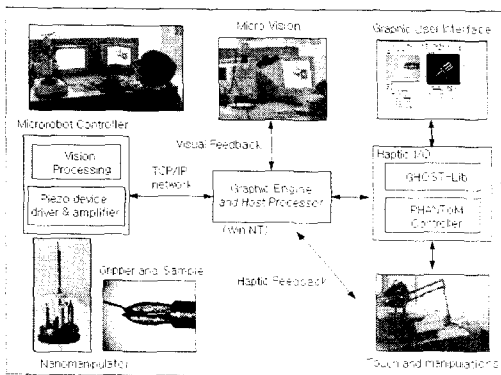


Fig. 1 KIST 마이크로 원격조종 시스템 구성도

### 2.2 마이크로 비전 시스템

visual 인터페이스의 성능은 원격조종을 통한 매

니플레이션 작업의 속도와 정밀도 등을 결정하는 중요 요소이다. 특히 마이크로 조립을 위해서는 비전시스템의 올바른 구성은 3 차원 마이크로 물체를 식별하고, 마이크로 매니플레이터의 피드백 위치제어를 위한 비전 인식, 조립을 위한 경로 생성, 작업계획(motion/task planning)을 하는데 있어 매우 중요하다.

마이크로 비전 시스템의 H/W 구성도는 그림 2 에 나타내었다. 비전 시스템은 스테레오 현미경 (Leica 사의 MZ 12.5 모델), 3 개의 CCD 카메라 (Sony XC-55 모델), 영상처리 frame grabber (Matrox 사의 GENESIS 보드), FMD (Olympus Eye-trek 200) 로 구성되어 있다. 단차가 큰 3 차원 마이크로 구조물의 형상인식 능력이 우수한 스테레오 현미경 (Leica MZ 12.5)에 탑재된 CCD 카메라 (Sony XC-55)를 통해 나오는 영상 이미지를 영상 처리를 위한 frame grabber (Matrox Meteror-2 MC 보드)로 전송이 된다. 영상 이미지는 모니터를 통해 1.8m\*2.4m 크기의 비디오 프로젝터와 FMD 를 통해 조작자에게 전달된다.

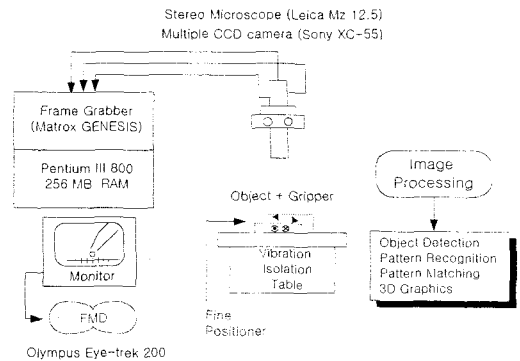


Fig. 2 마이크로 비전 시스템 H/W 구성도

마이크로 조립용 원격조종을 위한 visual 인터페이스 시스템의 특징을 요약하면 다음과 같다.

1) 3 차원 부품의 식별력이 우수한 스테레오 현미경 채용

스테레오 현미경(Leica Mz 12.5 모델)은 넓은 배율 조정범위와 함께 큰 해상도, 긴 free working distance 를 가진다. 3 차원 마이크로 형상체의 인식이 가능하도록 큰 depth-of-field 사양을 가지는데, 적배율에서는 일반적인 광학현미경(Mitutoyo FS60 optical microscope 모델 기준)에 비해 약 8 배, 고배율에서는 약 12 배 정도 크다. 수 um 의 물체에서 수 mm 까지의 물체의 인식이 가능하다. 일반 광

학 현미경의 경우 10mm 내외로 free working distance 가 아주 작아 광학현미경 하에서 manipulator 를 설치 구동할 수 있는 공간적인 제약성이 있는데 반해, 97mm 로 약 10 배 정도의 free working distance 를 가진다.

2) Multiple view 의 취득이 가능한 비전시스템 현미경을 통한 작은 field-of-view 는 micromanipulator 의 동작영역 제한을 가져오게 된다. 반면 큰 field-of-view 에 대해서는 정밀한 manipulation 또는 assembly 작업을 할 수 있는 visual feedback 정보의 분해능이 한계에 직면하게 된다. 광학 현미경으로 나오는 단일 field-of-view 한계를 극복하고자, 3 개의 CCD 카메라 (Sony XC-55) 를 탑재하고, frame grabber (Matrox GENESIS 보드) 를 통해 비전인식을 하고 있다. 그림 3 은 multiple view 기능을 가지는 마이크로 비전시스템의 동기된 영상 이미지를 나타내고 있다. 각각의 영상 이미지는 다른 배율, 다른 field-of-view 를 가지고 있으며, 선택적으로 다른 영상을 선택하면서 전체적으로 manipulator 의 작업영역을 볼 수 있음과 동시에 비전인식의 분해능을 높여 비전인식의 성능을 개선할 수 있다.

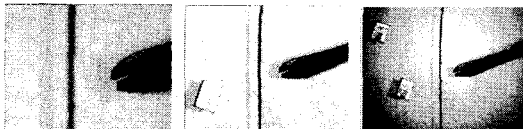


Fig. 3 다수의 선택적인 field-of-view 를 가지는 동기된 마이크로 비전 이미지 a) zoom factor : 3.0 b) zoom factor : 1.5 c) zoom factor : 1.0

3) 마이크로 원격조종의 편의성을 최대한 GUI (Graphic User Interface)

GUI 구현을 위해 low-level 의 그래픽 API 인 OPEN-GL 을 이용하여 그래픽 rendering 을 구현하였고, GHOST(General Haptics Open Software Toolkit) API 를 이용하여 high-level 의 Haptic rendering 을 구현하도록 하였다. 마이크로 스케일에서의 매니플레이터의 제어를 돕기 위해 조작자는 그림 4 와 같은 GUI 를 통해 마이크로 원격조종을 편리하게 할 수 있다. GUI 의 주요기능을 요약하면 다음과 같다.

1) 마이크로 비전에 의한 마이크로 매니플레이터의 작업영역(workspace)하에 구동의 모니터링, 2) Slave 마이크로 매니플레이터의 원격제어를 위한 scaling 조절, 3) 주조작 장치의 pose(위치, 각도) 정보를 작업자에게 제공, 4) TCP/IP 네트워크 관리 기능,

5) 마이크로 매니플레이터 동작의 그래픽 가시화 및 view point selection 기능, 6) 원격제어 mode 선정 기능 (direct teleoperation/task-based teleoperation), 7) slave 마이크로 로봇의 제어 파라미터의 설정이 가능하다.

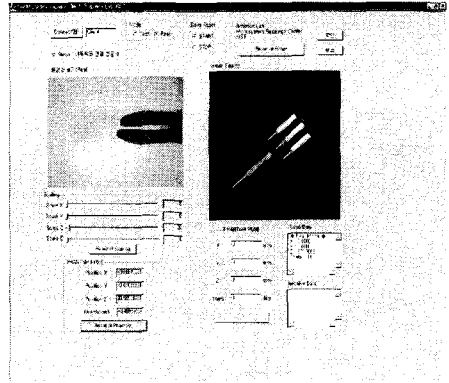


Fig. 4 마이크로 원격조종을 위한 GUI

### 2.3 Haptic 인터페이스

KIST 마이크로 원격조종 시스템의 haptic device 는 작업자의 조립 skill 을 효과적으로 추출하기 위해 6 자유도 PHANTOM haptic 인터페이스를 구현하였다. Haptic 인터페이스를 통해 작업자가 손가락을 통해 기구를 움직이며 압전구동형 micro gripper 를 제어하고, 비전인식을 통해 위치를 검출한다. 그림 4 의 GUI 상에 연속적으로 작업자로부터의 취득한 state 정보를 보여주고, haptic 인터페이스를 통한 마이크로 그리퍼의 제어에 관해 다양한 기능을 부가하였다.

### 3. Slave 마이크로 그리퍼의 제어

Slave 마이크로 매니플레이터에서 채용한 액츄에이터는 압전 구동방식의 선형 액츄에이터로 sub-nanometer 정도의 높은 해상도를 가지며, 수 mm 정도의 stroke 을 가진다. 3 자유도를 가지는 parallel link type 의 slave 마이크로 매니플레이터는 Klocke Nanotechnik 에서 개발한 4 개의 nanomotor 를 이용하여 2 자유도의 tilting 이 가능하고, 2 개의 nanomotor 를 이용하여 2 자유도의 그리퍼 운동이 가능하다.

마이크로 매니플레이터의 3 자유도와 마이크로 그리퍼의 2 자유도 운동의 제어는 각각 Piezo 선형 모터의 제어에 의해 이루어지며, Piezo 선형 액츄에이터의 제어 입력은 주파수, 전압, 제어시간의 3

가지 입력 지령에 따라 펄스 wave 형태(pulse wave stepper)로 형태로 인가된다. 인가된 제어신호는 D/A 변환기를 통해 아날로그 신호로 증폭되어 piezo 액츄에이터에 인가되며, 절대위치를 인식할 수 있는 별도의 위치센서가 없으므로 피드백 제어를 위해 비전인식을 통한 위치 검출을 하게 된다.

Piezo 선형 액츄에이터의 특성을 확인하기 위해 제어 입력 변수인 주파수, 전압, 제어시간에 따라 변위를 측정하는 실험을 수행하였다. 그림 5 을 위한 실험장치의 구성을 나타내고 있으며, 실험 결과는 그림 6 에 도시하였다.

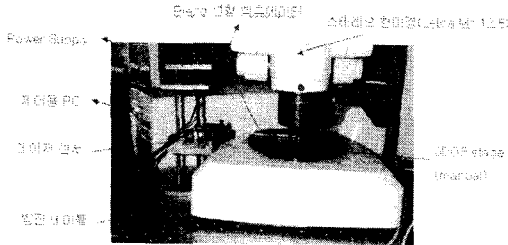
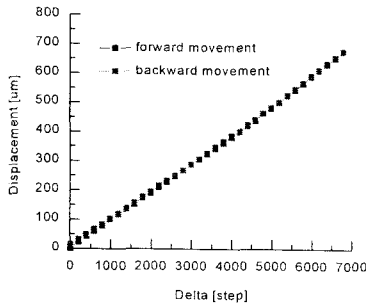
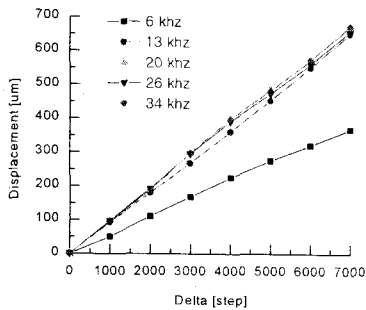


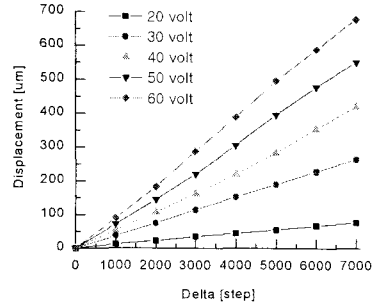
Fig. 5 압전 액츄에이터의 특성 실험 장치



a) Coarse steps vs. displacement w.r.t. forward and backward movement



b) Coarse steps vs displacement w.r.t. different frequencies



c) Coarse steps vs displacement w.r.t. different voltages

Fig. 6 압전 선형 액츄에이터의 특성 실험결과

그림 6 의 실험결과 a) 에서 보듯이 원격조종시스템의 slave 로봇의 구동 액츄에이터로 쓰이는 1축의 압전 액츄에이터에 대해 약 700 um 정도 변위 만큼 전진방향으로 구동하다가 다시 후진방향으로 구동하는 실험을 하였다. 대략 sub-micron 정도의 조립 정밀도를 목표로 할 때 제어를 위한 히스테리시스(hysteresis) 특성은 좋음을 확인하였다. 실험결과 b) 에서는 cut-off 주파수인 13 KHz 이상에서 제어입력에 대한 구동변위의 변화가 거의 없음을 확인할 수 있었다. 이러한 제어주파수 특성을 고려하여 주파수 입력을 결정하였다. Piezo 액츄에이터의 최대 제어 입력 전압이 60 V 로서 실험결과 c) 에서 보듯이 구동전압에 따라 구동변위가 선형적으로 변하는 것을 확인할 수 있다.

## 4. Haptic Interface 를 이용한 마이크로 원격조종

### 4.1 조립을 위한 마이크로 원격제어 전략

그림 7 은 마이크로 조립을 위해 제안한 원격조종 전략을 나타내는 블록 선도이다. 일반적으로 원격지의 slave 로봇을 구동하는데, 직접 작업자에 의해 master 기구를 조종한 운동 data 가 전달되는 원격제어 기법이 사용되며 이를 가르켜 직접 원격 제어법(direct teleoperation)이라 한다. 마이크로 원격조종에서 이러한 기법을 흔히 도입하였는데 작업자는 현미경을 통해 마이크로 매니플레이터 움직임의 시각적인 정보를 받아 master 기구를 조종하는 방법을 사용한다. 그러나, 마이크로 원격조종에서는 조작자의 미세한 떨림과 같은 움직임이 매우 정밀한 작업이 요구될 때 매니플레이터 운동에 치명적인 오차를 가져올 수 있으므로 항상 효과적이지는 않다. 마이크로 스케일에서 다양한 매니플

레이션 작업에 대응할 수 있는 새로운 원격제어 방법이 필요하다.

본 연구에서는 마이크로 매니플레이션의 작업 성격에 따라 직접 원격조종(direct teleoperation) 방법과 매니플레이터의 운동 경로(motion path) 생성과 조립을 위해 요구되는 다가가기(approach), 이송(move), 잡기(grasping), 놓기(release) 등의 매니플레이션 작업 등만 작업자가 user interface 를 통해 선정해 주고 이에 따른 미세한 정밀제어는 미리 입력된 마이크로 로봇의 local 제어프로그램에 의해 가능하도록 하는 작업 기반의 지능 원격제어 기법(task-based intelligent teleoperation)을 제안한다.

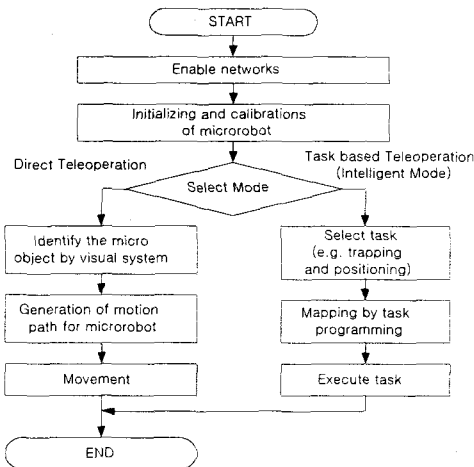


Fig. 7 마이크로 원격조종 전략의 블록선도

#### 4.2 Haptic Interface 를 이용한 마이크로 원격제어

표 1 은 KIST 마이크로 원격조종 시스템에서 사용되고 있는 master 와 slave 로봇의 자유도 및 구동 방식, 구동 액추에이터, 기구학 구조, 작업영역 등을 비교한 것이다.

원격조종 시스템에서 Master/Slave 사이의 자유도, 기구학 구조(serial/parallel), 구동 방식 (Master 기구는 흔히 DC 모터구동, Slave 로봇은 흔히 (선형, rotary) 압전 구동), 작업영역 등의 상이성(difference)이 있는데, 마이크로 원격조종 시스템에서는 이러한 상이성이 원격제어성능에 미치는 영향이 더욱 크다.

먼저, 정밀한 마이크로 원격조종 작업을 하기 위해, master 기구와 slave 마이크로 로봇사이 운동의 적절한 스케일링(scaling)과 필터 설계 등을 통한 shaping 이 필요하다. 본 연구에서는 지정된 매

표 1 Master 기구와 Slave 마이크로 로봇 비교

항 목	Master	Slave
자유도	6 D.O.F	2 DOF (gripper) 3 DOF (manipulator)
구동기	DC 모터	압전모터
구동방식	Rotary	Linear
센싱	Encoder	N/A (개루프 제어)
기구구조	Phantograph	Parallel
작업영역	19X27X38 cm	5X5X19 mm

니플레이션 task 에 대해 Master 와 Slave 마이크로 매니플레이터의 운동 데이터를 취득해 보며, 매니플레이션 작업에 따라 적절한 스케일 factor 를 선정하였다.

그림 8 은 KIST 마이크로 원격조종 시스템의 Master 와 Slave 사이의 상이한 이질적(heterogeneous)인 기구 구조를 도시한 것이다. 2 자유도 마이크로 그리퍼의 제어를 위해 두개의 압전모터가 사용되었다. 한개는 그리퍼의 길이방향(z)의 운동을 위한 것이고, 또 하나는 압전 tube 의 이송을 통한 그리퍼의 파지를 위한 것이다. 6 자유도 PHANToM Haptic 인터페이스를 통해 (x,z)의 운동을 마이크로 그리퍼의 이송과 파지 제어를 위해 각각 사용하였다. 그러나, 접근(approach), 파지(grasping), 이송(movement), 놓기(release)의 작업을 haptic 인터페이스를 통해 마이크로 그리퍼로 수행할 때 파지후 이송시에 정밀한 제어가 어렵고 부정확하다. 이는 길이방향의 이송 뿐만 아니라, 그리퍼의 압전 tube 를 조여 파지를 수행하는 것 또한 선형 압전 액추에이터에 의한 것으로 두가지 구동 사이에 서로 영향을 주기 때문이다.

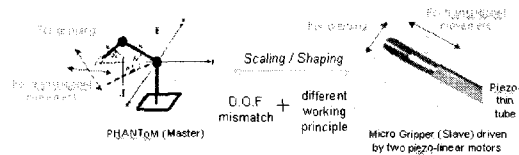


Fig. 8 마이크로 원격조종 시스템 Master-Slave 의 상이한(heterogeneous) 구조

slave 로봇인 압전 구동형 마이크로 그리퍼의 원격제어를 할 때, 여러 제어 입력 변수중에 기 지정된 전압, 주파수 입력에 대해 delta (pulse wave stepper 형태의 제어입력 인가시간)을 PHANToM haptic 인터페이스를 통해 변화시킨다. 2 자유도의 마이크로 그리퍼를 6 자유도의 PHANToM 으로 제어하는 데 있어, gripping 작업인지, 단순 이송작업

인지에 따라 2 자유도 구동을 위한 압전 선형 액츄에이터의 제어 파라미터를 on-line 으로 조절하여 파지 후 이송시에 정밀성을 높이고, 원하는 지점에서 놓기(release)가 가능하게 되었다.

## 5. 마이크로 원격조작 실험

그림 9 에서 보듯이 마이크로 원격조종 시스템의 성능을 검증해 보기 위해 몇 가지 마이크로 부품 대상체의 원격조작 실험을 수행하였다. 주조작기의 6 자유도 중 2 자유도를 이용하여 그리퍼의 위치와 파지 동작을 제어하였다. 그림 10 에 나타내듯이 Haptic 인터페이스에 의해 약 100 um 정도의 광 파이버를 잡고 조작자가 원하는 목표지점으로 이송하는 것이 가능하다. 마이크로 원격조작 시스템을 통해 광부품, 바이오 셀과 같은 마이크로 대상체의 조작이 가능하다.

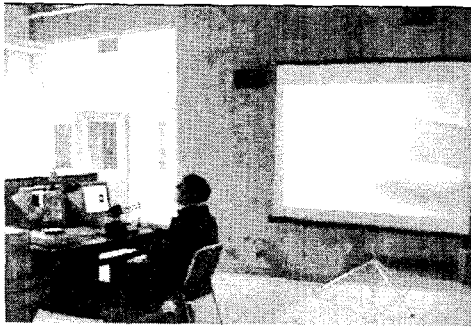


Fig. 9 KIST 마이크로 원격조작 실험

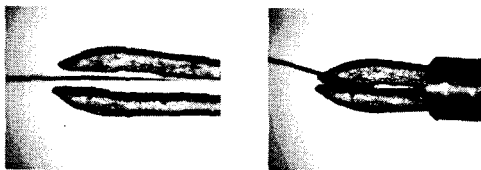


Fig. 10 Optical fiber 를 잡고 이송하는 마이크로 원격조작

## 6. 결 론

마이크로 조립시스템의 원격조종은 마이크로 세계와 조종자를 연결시켜 주는 중요한 Interface로서, 작업자의 조립 skill 을 효과적으로 조립셀에 전달하여 주는 동시에, 조립에 필요한 다양한 센싱 정보(위치, 힘, 비전)를 작업자에게 되돌려 준다. 본 연구에서는 인간 조작자가 마이크로 세계

에서의 작업, 예를 들어 조립작업, 생산작업 등을 편안하게 수행할 수 있는 마이크로 조립셀의 원격 제어 시스템을 구축하였다. 또한, 마이크로 조립을 위한 매니플레이터의 원격 제어법을 제안하고 마이크로 대상체의 한 예로 Optical Fiber 의 파지작업, 원하는 위치에 이송하는 작업을 수행함을 통해 구성된 시스템의 효과성을 검증하였다. 마이크로 조립을 위해 비전인식의 개선을 통해 마이크로 매니플레이터의 피드백 제어 성능 향상, 다물체 조립을 위한 경로생성, 작업계획 등이 현재 진행 중이다.

## 후 기

본 내용은 과학기술부 21 세기 프런티어개발사업 중 “지능형마이크로시스템개발사업단”의 연구비 지원을 받아 수행한 연구결과입니다. (<http://www.microsystem.re.kr>)

## 참고문헌

- (1) T. Fukuda and F. Arai, 2000, “Prototyping Design and Automation of Micro/nano Manipulation System”, *Proc. of the 2000 IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation*, San Francisco, pp.192~197, April.
- (2) A. Menciassi, M.C. Carrozza, C. Ristoni, G. Tiezzi, and P. Dario, 1997, “A Workstation for Manipulation of Micro Objects”, *ICAR '97*, Monterey, pp.253~258, July.
- (3) T. Tanikawa and T. Arai, 1999, “Development of a Micro-Manipulation System Having a Two-Fingered Micro-Hand”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.15, No.1, pp.152~162.
- (4) S. Fahlbusch, S. Fatikow, J. Seyfried, and A. Buerkle, 1999, “Flexible Microrobotic System MINIMAN : Design, Actuation Principle and Control”, *Proc. of 1999 IEEE/ASME Intl. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp.156~ 161.
- (5) P.Helin, M.Calin, V.Sadaune, N.Chaillet, C.Druon, and A.Bourjault, 1997, “Micro-Conveying Station for Assembly of Micro-Components”, *Proc. of the 1999 IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robot and Systems*, pp.1306~1311.
- (6) Deok-Ho Kim, Keun-Young Kim and Kyunghwan Kim, 2001, “A Micro Manipulation System based on Teleoperation Techniques”, 32nd International Symposium on Robotics (ISR2001), Seoul. April.