

스캐닝 레이저 광집계를 위한 스캐닝 경로 추적 및 보상

Scanning Path Monitoring and Compensation for Scanning Laser Optical Tweezers

황선욱[#], 이용구^{*}

[#]광주과학기술원 정보기전공학부, suhwang@gist.ac.kr,

^{*}광주과학기술원 정보기전공학부, 교신저자 lygu@gist.ac.kr

광집계(Optical tweezers)는 레이저 빔을 대물렌즈로 강하게 집속하여 반사와 굴절을 통해 생기는 모멘텀 차이로 발생하는 광압(Radiation pressure)을 이용하여 대상 물체를 포획하는 기술이다⁽¹⁾. 이 기술은 수십 나노미터에서 수십 마이크로미터에 이르는 크기의 물체를 원하는 위치로 배치하고 제어할 수 있으며 AFM 및 gripper에 비해 포획과 방출이 쉬워 기계, 물리, 화학, 생명공학 등 다양한 분야에서 효율적인 수단으로 활발한 연구가 이루어지고 있다⁽²⁾. 스캐닝 레이저 광집계(Scanning laser optical tweezers)는 다수의 구형체를 동시에 포획하거나 로드와 같은 비대칭 형상의 물체를 정교하게 포획하기 위해 고속 스캐닝이 가능한 기계 장치를 이용한다. 본 연구에서는 대물렌즈에 의해 집속된 레이저 초점을 3차원으로 위치 제어하기 위해서 피에조 기반의 틸트 스테이지(Tilt stage)와 리니어 스테이지(Linear stage)를 이용하였다. 틸트 스테이지는 두 개의 축으로 $\pm 5\text{mrad}$ 회전할 수 있으며 이를 통해 레이저 초점을 광학축에 수직인 평면상에서 움직이게 한다. 리니어 스테이지는 대물렌즈를 $\pm 75\mu\text{m}$ 이동할 수 있으며 광학축 상으로 레이저 초점을 대물렌즈 이동량 만큼 움직이게 한다. 따라서 두 장비의 조합으로 레이저 초점을 3차원 공간상에서 제어하여 복잡한 형태의 트랩을 만들 수 있다. 그러나 틸트 스테이지와 리니어 스테이지는 주파수 특성을 가져 입력 주파수에 따라 출력 신호의 크기가 변한다. 일반적인 기계시스템의 주파수 특성은 고속으로 갈수록 입력 신호 대비 출력 신호가 감소하는 형태를 나타내며 제어 가능한 주파수 범위는 대역폭에 의해서 제한된다. 사용한 피에조 기반의 스테이지는 이러한 주파수 특성을 나타내며 이로 인해 두 장비를 구동할 때 입력 신호의 주파수에 따라 출력이 감소하여 적은 범위를 스캐닝하게 되고 결국 다른 형태의 경로를 스캐닝하게 된다⁽³⁾. 그러나 실제 실험에서 이러한 입/출력 신호의 괴리는 관찰이 쉽지 않다. 그 이유는 레이저에 의한 CCD 카메라의 손상을 방지하기 위해 미러 또는 필터를 이용하여 대부분의 레이저는 차단하고 미량의 레이저만 CCD 카메라로 전달하기 때문이다. 따라서 사용자는 원하는 형태로 레이저를 스캐닝하고 있는지 확인하기 어려우며 희미하게 보이는 레이저 스캐닝 패턴을 보고 대상물체를 조작한다. 이러한 이유로 정밀한 레이저 트랩의 구현이 어려워지고 대상 물체의 형상에 따라 물체를 포획할 수 없거나 포획하더라도 안정된 제어를 할 수 없게 된다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해서 주파수 특성에 따른 실제 스캐닝 경로를 측정하여 시각화해주는 방법과 입출력 데이터의 차이를 계산하여 입력데이터를 보상하는 방법을 제안한다.

그림 1은 본 연구에서 사용한 실험 구성을 나타낸다. 실험 장치는 반전 현미경(Inverted microscope) 형태의 구조를 가지고 있으며 입사된 레이저는 4 개의 렌즈 조합을 통해 입력 레이저를 약 3배 확대하며 dichroic mirror(DM)를 통해 대물렌즈로 입사되어 강하게 집속된다. 집속된 레이저 초점은 샘플에 산란된 후 다시 대물렌즈로 수집되며 튜브 렌즈(L5)에 의해 CCD 카메라에 상을 맺게 된

다. 이 레이저 초점은 틸트 스테이지, 리니어 스테이지의 운동에 의해 3차원으로 위치제어되며, 사용자의 직관적인 제어를 위해서 틸트 스테이지, 리니어 스테이지, 샘플 스테이지, CCD 카메라는 컴퓨터에 의해 제어된다.

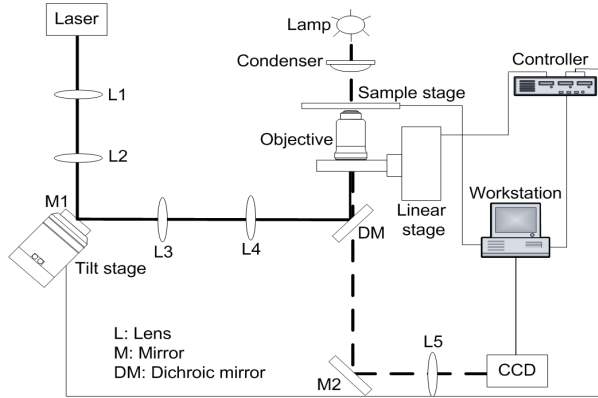


그림 1. 스캐닝 레이저 광집계 실험 셋업

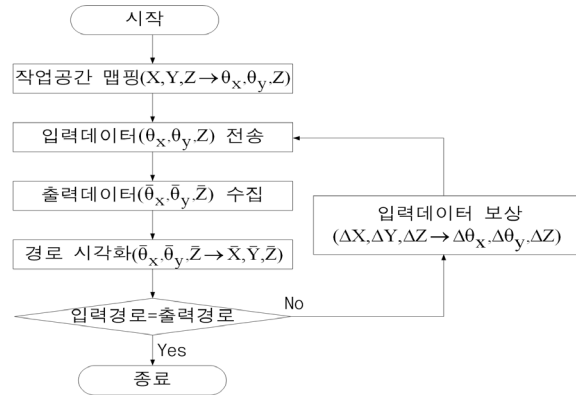


그림 2. 입력 데이터 보상 알고리즘

그림 2는 입력 데이터 보상 방법을 나타내는 알고리즘을 나타낸다. 알고리즘은 크게 작업공간 맵핑, 입력 데이터 전송 및 출력 데이터 수집, 입출력 스캐닝 경로 시각화, 입력 데이터 보상으로 이루어진다. 작업공간 맵핑에서는 레이저 스캐닝 경로를 시각화하기 위해서 틸트 스테이지와 리니어 스테이지가 최대로 움직일 때 만들어지는 영역(작업공간) 상의 점을 맵핑 요소를 이용하여 피에조 기반 스테이지의 입력 데이터로 맵핑한다. 이를 위해 먼저 틸트 스테이지가 최대로 움직일 때 만들어지는 영역을 나타내는 9 개의 점을 마우스로 입력하여 틸트 스테이지의 맵핑 요소를 계산한다. 리니어 스테이지의 경우 실제 이동량이 그대로 레이저 초점의 이동이 되므로 계산된 틸트 스테이지의 맵핑 요소 및 대물렌즈 최대 이동량($\pm 75\mu\text{m}$)을 이용하여 리니어 스테이지의 맵핑 요소를 계산한다. 작업공간 맵핑 후 입력 데이터는 컨트롤러로 전송되며 틸트 스테이지와 리니어 스테이지를 제어한다. 이 때 틸트 스테이지와 리니어 스테이지의 실제 이동 데이터는 각 스테이지에 부착된 코패시턴스 센서에 의해 측정되어 컨트롤러를 통해 컴퓨터로 전송된다. 다음으로 계산된 맵핑 요소를 이용하여 입출력 레이저 스캐닝 경로를 CCD 영상 위에 시각화한다. 만약 시각화된 입출력 스캐닝 경로가 다르다면 입출력 차이를 계산한 후 맵핑 요소를 이용하여 입력 데이터를 보상한다. 입력데이터가 보상되면 입력 주파수에 따른 출력 데이터의 감소를 보상할 수 있어 결국 사용자가 원하는 경로로 장비를 제어하여 물체를 안정되게 포획할 수 있다. 또한 키보드, 마우스를 이용하여 시각화된 스캐닝 경로를 작업 공간상에서 이동, 회전하고 동시에 변경된 스캐닝 데이터를 두 피에조 기반 스테이지로 전송함으로써 물체를 안정되게 이동하거나 회전할 수 있다.

감사의 글

이 연구는 광주과학기술원 생체적용나노기술연구센터의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. A. Ashkin, "Forces of a single-beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime," *Biophysical Journal* 61(2), 569-582 (1992).
2. K. C. Neuman and S. M. Block, "Optical trapping," *Review of Scientific Instruments* 78, 2787-2809 (2004).
3. S. U. Hwang, I. Y. Park, J. H. Song, T. W. LeBrun, N. G. Dagalakis, C. Gagnon, A. Balijepalli and Y. G. Lee, "Three-dimensional scanning optical tweezers," *Proc. of SPIE* 6048, pp. 604803 (2005).