

홀로그래픽 저장장치의 픽셀 매칭을 위한 5 축 피코모터 제어

이재성*(연세대 대학원 기계공학과) 최진영(연세대 CISD),
양현석(CISD CISD), 박영필(연세대 CISD)

5 Axis Picomotor Control for Pixel matching in Holographic Data Storage

Jae Sung Lee(Mechanical Eng. Dept, Yonsei Graduate School), Jin Young Choi(Yonsei Univ. CISD),
Hyun Seok Yang (Yonsei Univ. CISD), Yonng Pil Park (Yonsei Univ. CISD),

ABSTRACT

In this paper, a new visual servo method, which uses 5 axis picomotor to compensate the misalignment generated between a SLM and a CCD in a holographic storage device, was proposed and the effectiveness of it was proved by the experiment. In a holographic storage device, the data processing is done by the SLM and the CCD, and the shape of data is 2 dimensional binary patterns. Therefore, the exact image matching between the SLM and the CCD is very important, and the mismatching of it causes the errors in the data reconstruction. First, the brief introduction of a holographic data storage is given, then, BER concept which is errors caused by pixel mismatch between the SLM and the CCD is defined. Second, the geometric relation between 5 axis picomotor and the CCD movement is studied. Finally, the visual servo method using 5 axis picomotor to reduce the BER in a holographic storage device is proposed and experimented. From the experiment, we find that about 3 % BER improvement is obtained by the proposed method.

Key Words : Holographic Data Storage(홀로그래픽 저장장치), Pico motors(피코모터), Pixel matching(픽셀 정합), BER(비트에러율), Visual Servo(비주얼 서보), SLM(Spatial Light Modulation)

1. 서론

홀로그래픽 저장 장치는 빛의 간섭 현상을 이용하여 데이터를 기록하는 방식으로, 동일 공간에 2 차원의 페이지 형태로 표현되는 데이터를 다중 기록할 수 있는 장치이다. 다중 기록 특성으로 인하여 고용량의 데이터 저장이 가능하고, 2 차원의 페이지 단위로 데이터를 입출력이 이루어지므로 기존 광정보 저장장치에 비하여 상당히 빠른 데이터 전송 속도를 가진다. 따라서 홀로그래픽 저장장치는 차세대 대용량 광정보 저장장치로 근래 많은 관심을 많은 각광을 받고 있다.^{1,2}

기존 광정보 저장장치가 데이터를 변조(modulation)하여 1 차원에 데이터로 생성하는 반면, 홀로그래픽 저장장치는 데이터를 2 차원의 데이터로 이진 표현하여 데이터를 입출력 한다. 이때 2 차원의 데이터는 SLM 이라는 장치를 통하여 공간적으로 on/off 픽셀 형태로 입력되고, 매질에 기록되면 기록된 데이터는 CCD 카메라에 의하여 이미지

형태로 복원된다. 이 때 시스템을 구성하고 있는 광학 기기들의 비정렬(misalignment)이나, 기록 매질의 수축 등은 CCD 카메라에서 얻는 이미지를 왜곡 시키게 된다. 이러한 현상은 카메라 이미지 데이터로부터 원래의 2 차원의 2 진 데이터를 복원하는데 영향을 주게 되며, 결과적으로 원래 데이터와 다른 데이터 출력 값을 가져올 수 있다. 입력 데이터와 출력 데이터와의 차이는 BER(bit error rate)이라는 파라미터를 이용하여 평가하며, 이 파라미터는 직접적으로 SLM 과 CCD 카메라의 정렬 정도에 의존한다. 따라서 본 논문에서는 홀로그래픽 저장장치에서 SLM 과 CCD 카메라의 비정렬을 보상하기 위한 방법을 제안하고, 이를 검증하였다.

광학계 비정렬로 인한 픽셀 단위의 오차는 CCD 카메라의 검출 부위를 변경하는 후처리를 통하여 개선 될 수 있으나 정확한 픽셀 정합은 할 수가 없다. 이에 반해 높은 해상도를 가진 피코모터 스테이지 위치 및 자세를 제어함으로써 정확한 픽셀 정합으로 보다 나은 BER 을 얻을 수 있음을 실

험적으로 확인하였다.

2. 홀로그래픽 저장장치와 5축 피코모터

2.1 홀로그래픽 저장장치의 데이터 입출력과 픽셀정합

홀로그래픽 저장장치는 2 차원의 2 진 데이터를 페이지 단위로 입출력하며, 데이터의 입력은 SLM 을 통하여 그리고 기록된 데이터의 복원은 CCD 카메라에 의하여 수행된다. Fig.1.(a)는 기록 시 SLM 에 의하여 생성되는 데이터 패턴의 한 예를 보여주며, 기록된 데이터는 Fig.1.(b)와 같은 형태로 CCD 에 의하여 검출된다. 이때 SLM 1 개의 픽셀의 on/off 데이터를 검출하기 위하여 CCD 픽셀과의 관계가 중요하며, 일반적으로 SLM 픽셀과 CCD 픽셀의 크기가 다르므로 다운 샘플링(down sampling) 기법을 이용하여 데이터를 복원한다. 실험에 사용된 SLM 의 한 픽셀의 크기는 36 μm 이고 CCD 카메라의 한 픽셀의 크기는 9 μm 로, SLM 1 개의 픽셀을 검출하기 위하여 16 개의 CCD 픽셀이 사용된다 (Fig.1.(c) 참조).

이 때 SLM 의 픽셀과 CCD 픽셀과의 정합 관계(pixel matching)은 매우 중요하며, 이것이 정확히 이루어지지 않으면 SLM 의 on/off 데이터가 CCD 에서 잘못 인식될 가능성이 커진다. 즉, SLM 의 on/off 데이터는 레이저에 의하여 빔의 세기(intensity) 형태로 CCD 픽셀에 분포되는데, 이 때 SLM 과 CCD 픽셀과의 관계가 1:16 의 형태로 정확한 정합 관계를 유지하지 않으면 에러가 발생할 가능성이 커진다.

SLM 와 CCD 의 1:16 의 정합 관계의 영향을 주는 파라미터로는, (i)SLM 과 CCD 사이의 거리(포커싱), (ii) SLM 과 CCD 중심 축과의 일치 정도, 그리고 (iii)SLM 입사면과 CCD 검출면 사이의 회전 및 기울어짐이 영향을 미친다.

2.2 픽셀 정합을 위한 5축 피코모터

SLM 과 CCD 이미지의 올바른 정합을 위해서, 5축 제어가 가능한 정밀 피코 모터를 본 논문에서 적용하였다(NewFocus 社., 모델 8082). 조절 가능한 파라미터는 $x, y, z, \theta_y, \theta_z$ 이며(Fig.1 참조), 선형 이동 범위는 3mm 이고, 30nm 이하로 미세 조정이

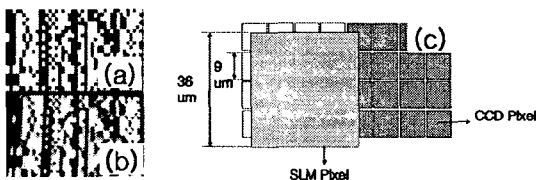


Fig. 1 (a) original image (SLM)
(b) detected image (CCD)
(c) pixel matching concept: SLM vs. CCD

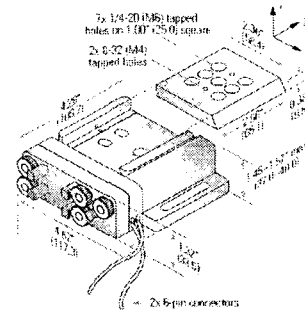


Fig. 2 5axis picomotor stage

가능하다. 각 변화 범위는 8° 이고, 0.7 μrad 이하의 미세조정을 할 수 있으나, pitch 방향에는 제약이 있다. 피코 모터의 출력이 검출되지 않는 개루프 시스템이므로, 본 논문에서는 CCD 카메라에서 얻은 이미지를 분석하여 제어를 행하는 비주얼 서보(visual servo) 방식을 채택하였다. 5축 피코모터를 이용한 픽셀 정합은 다음 장에서 보다 상세히 다루도록 한다.

3. 피코모터를 이용한 픽셀정합 메커니즘

본 장에서는 5축 피코모터를 이용한 SLM 과 CCD 픽셀 정합을 보다 상세히 다루었다(Fig.2). 우선 CCD 카메라의 회전과 관련된 yawing, rolling 그리고 CCD 의 이동과 관련된 focusing 및 상하 좌우 방향의 이동에 대하여 각각 기술하였다.

3.1 Yawing Control

Fig.2 에서 입사빔이 CCD 카메라에 수직으로 입사할 때, 페이지 전 영역에서 렌즈와의 초점거리를 만족시킬 수 있다. Fig. 3(a)에서 A 피코모터를 미소 변위 움직인 후 A, B 피코모터를 같은 거리 움직일 경우 재생상의 변화가 크지 않은 지점을 찾을 수 있다. 이때 위치를 입사빔이 CCD 면에 수직으로 입사하는 위치로 정할 수 있다.

3.2 Focusing Control

상이 초점면에 있을 경우 그레이 스케일의 이미지의 히스토그램은 0 과 255 부근에서 높은 피크점

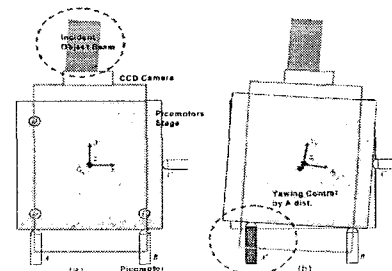


Fig. 3 (a)(b) Yawing control

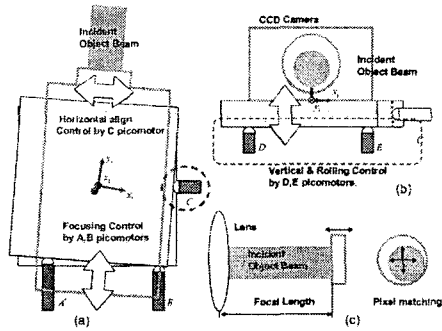


Fig. 4 (a) focusing, (b) rolling, (c) pixel matching

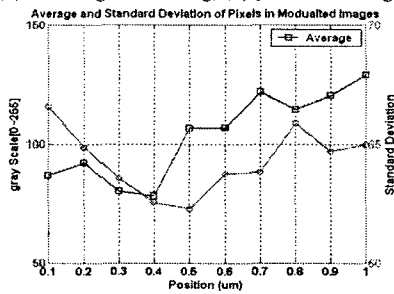


Fig. 5 (a)(b) average and standard deviation about distance of light source

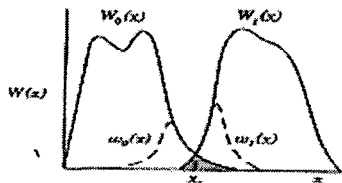


Fig. 6 Intensity distribution of one and zero in reconstruction image

을 갖게 된다. 이러한 분포를 갖기 위해서는 표준편차의 크기가 상대적으로 커야 한다. 이때의 면을 초점면으로 정할 수 있다. 포커싱 제어를 하기 위해 Fig. 4(a)에서 A, B 피코모터를 같은 크기만큼 이동하면 된다.

Fig. 5는 A, B 피코모터를 $0.1 \mu\text{m}$ 단위로 움직일 때의 빔 강도의 평균과 표준편차를 나타내고 있다. 기준위치에서 $0.4 \mu\text{m}$ 지점에서 62.3의 표준편차를 갖고 이때 면을 초점면으로 정한다.

3.3 Rolling Control 과 픽셀 정합

5 축 피코모터는 pitch에 대한 제어는 할 수 없지만, Rolling은 제어할 수 있다. Fig. 4(b)에서 이미지의 기울어짐을 D 피코모터를 통해 제어한다.

BER의 크기가 최소가 되는 지점을 찾기 위해, 피코모터를 제어하기 위한 기준 파라미터로 BER의 크기로 정하였다. 이때 페이지내의 모든 이진 데이터를 원본 데이터와 비교하여 BER를 검출하는 것은 많은 계산 시간이 소비되기 때문에 국부적

인 참조자 영역의 빔의 세기 분포를 토대로 확률적인 BER를 구하였다. 일반적으로 빔의 세기(intensity) 형태가 가우시안 분포를 갖기 때문에, 이진화된 페이지의 재생이미지는 Fig. 6과 같이 분포하고 에러가 나타날 수 있는 확률분포를 통해 예측적으로 BER을 얻을 수 있다.

$$BER \approx \frac{1}{2} \left[\int_{-1}^1 w_1(x) dx + \int_{-1}^1 w_0(x) dx \right] \quad (1)$$

식(1)를 통해 BER을 추측적으로 구할 수 있다. $w_1(x)$, $w_0(x)$ 는 각각 1과 0의 빔의 세기 분포 히스토그램이고 정규화한 식이다. 각각의 확률분포가 문턱값을 넘는 영역의 면적의 합으로 BER을 계산할 수 있다. 이를 CCD 픽셀 단위의 위치 이동을 통한 되먹임 제어함으로써 최소의 BER을 만족하는 위치를 찾을 수 있다. Fig. 4(c)에서 이미지의 정확한 픽셀 정합을 하기 위하여 C, DE 피코모터를 이용하는 것을 보여주고 있다.

4. 실험 결과 및 평가

실험은 Fig. 7과 같이 구성하였다. SLM의 이미지를 CCD에서 읽어 들인 후, 다운 샘플링(oversampling, 16:1)으로 축소된 데이터를 원본 데이터와 비교하고 그에 따른 위치 자세 제어 명령을 제어기로부터 피코모터로 지령하게 되어있다.

4.1 고정이미지에 대한 픽셀단위 이동에 따른 BER의 변화

Fig. 2(c)에서 알 수 있듯이 CCD 픽셀 16개의 평균값을 이용하여 SLM 데이터를 처리하게 된다.

먼저 CCD 카메라의 검출 부위를 변경하는 후 처리를 통하여 개선될 수 있는 BER를 시뮬레이션하였다. 기계적인 위치 이동이 아닌 검출 부위를

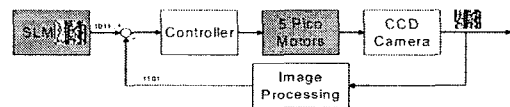


Fig. 7 experiment schematics

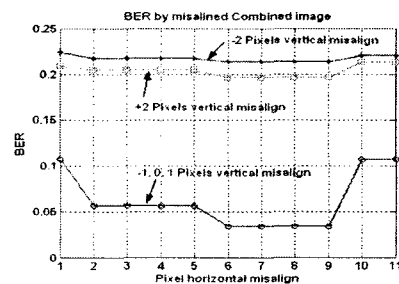


Fig. 8 BER deviation by shift of pixel size

CCD 픽셀 크기 만큼 이동할 경우 수직 방향으로 2 픽셀 크기 보상으로 17% 향상되었고, 수평 방향으로 3% 향상되었다. 하지만 픽셀 이동으로도 BER 이 변하지 않는 것은 이산적인 위치 변화로 인해 최소의 BER 을 갖는 지점 역시 정확한 픽셀 정합이 되지 않는 것을 알 수 있다. 즉 수평, 수직 방향으로 픽셀 크기의 이동을 할 경우 정확한 픽셀 정합 지점을 지난 부분의 BER 을 얻게 되는 것이다. 따라서 정확한 픽셀 정합을 이산적으로 CCD 픽셀과 맞출 수 없기 때문에 픽셀 크기보다 작은 변위로 조정하며 최적의 픽셀 정합 위치를 찾아야 한다.

피코모터는 30nm 이하로 미세 조정이 가능하기 때문에 CCD 카메라의 한 픽셀의 크기인 9um 보다 작은 연속적인 위치 변화를 할 수가 있다. 이에 0.15um 변위 변화에 따른 BER 의 변화를 실험하였다. Fig. 9 에서 피코모터를 사용하여 정밀한 픽셀 정합이 가능함을 보여주고 있다.

4.2 연속적인 위치변화에 따른 BER 의 변화

피코모터를 이용하여 0.15um 를 이동할 마다의 BER 의 변화를 실험하였다. 픽셀 단위의 픽셀 정합된 상태에서 BER 은 0.037 이었고, 이를 피코모터를 이용하여 보다 정밀하게 변화해 가며 BER 을 측정하였다. Fig. 10 에서 BER 이 0.045 에서 0.025 까지 내려감을 알 수 있다. 즉 피코모터를 이용하여 정밀 제어로 BER 0.02(2%) 향상시킬 수 있음을 실험적으로 확인 하였다

이때 재생된 이미지에 대한 error bits 가 Fig. 11 에서 보여주고 있다. 흰색 점은 원본과의 차이를

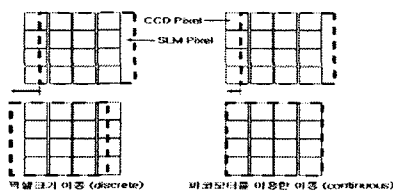


Fig. 9 precious pixelmatching using picomotor

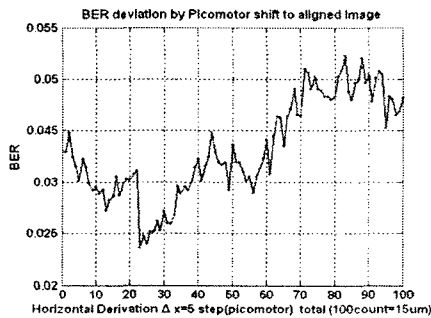


Fig. 10 BER deviation by precious shift



White points are different pixels with original image pixels

Fig. 11 (a) by shift of pixel sizes (b) by using picomotor

가지는 bit 를 의미한다.

Fig.11 (a)는 픽셀 단위의 이동으로 정렬한 이미지의 에러 비트를 나타내고, Fig.11 (b)는 이 위치에서 피코모터를 이용한 정밀제어로 얻은 이미지의 에러를 보여주고 있다. 총 1200 개의 bit 에서 80 개의 error bits 가 55 개로 감소함을 알 수 있다.

5. 결 론

SLM 과 CCD 사이에서 발생할 수 있는 픽셀의 부정합에 의한 현상을 분석하고, 5 축 피코모터를 이용하여 부정합을 보상하는 방법에 대하여 연구하였다. 먼저 피코 모터의 움직임과 CCD 의 관계를 기하학적으로 분석 하였으며, 이와 관련하여 BER 이 발생하는 매커니즘을 간략히 정리하였다. 다음으로 왜곡된 이미지 보정을 위하여, CCD 로부터 얻어진 데이터를 후처리(post processing)하여, 이를 이용하여 피코 모터를 제어하는 비주얼 서보 방안을 제안하였다.

알고리즘을 통하여 왜곡된 데이터를 처리할 수 있지만, 이는 많은 계산량과 더불어 보상 가능한 상한값이 존재한다. 따라서 SLM 과 CCD 사이의 픽셀 정합을 위하여 5 축 피코모터를 이용이 효율적이며, 제안된 방법을 통하여 BER 을 저감할 수 있음을 실험적으로 증명하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 차세대대용량 정보저장 장치 개발사업(00008145)과 한국과학재단(R11-1997-042-11002-2)의 지원으로 수행되었으며 관계자 여러분들께 감사 드립니다.

참고문헌

1. F.H.Mok, M.C. Tachitt and H.M. Stroll, "Storage of 500 high-resolution holograms in a LiNbO3 Crystal", Opt. Lett. 16 605-607 (1991)
2. Hans J.coufal, Demetri Pasaltis, Glenn T.Sincerbox , "Holographic Data Storage",
3. NewFocus Inc., "Motorized Kinematic Stage 8082"
4. Steven C. Lawlor, "Computer science with C++"