

충천연색 광 스캐닝 홀로그래피 카메라 기술 개관

조광훈, 김태근
세종대학교

요약

실제 물체의 홀로그래프 정보를 획득하는 카메라 기술에 대한 관심이 증가되고 있다. 홀로그래프 카메라와 관련된 다양한 연구 역시 활발히 진행되고 있다. 본고에서는 충천연색 광 스캐닝 홀로그래피 카메라 기술에 대해 소개하고 충천연색 광 스캐닝 홀로그래피 카메라 시스템의 복잡도를 줄이기 위한 방법을 논한다.

I. 서론

최근 실제 물체의 홀로그래프 정보를 디지털 신호 형태로 추출하는 다양한 방법론이 제시되고 있다. 실제 물체의 홀로그래프 정보를 획득하는 다양한 방법 중 광 스캐닝 홀로그래피 기술은 스펙클 잡음(speckle noise) 없이 실제 물체의 홀로그래프 촬영이 가능하다는 장점을 가지고 있다 [1][2]. 일반적인 디지털 홀로그래프 촬영 기법은 촬상소자를 이용해 홀로그래프를 획득하지만 광 스캐닝 홀로그래피는 광 검출기(photo detector)를 사용하여 디지털 홀로그래프를 획득한다는 점에서 촬상소자 해상도에 제한을 받지 않는다는 장점도 있다[2]. 최근 전자-광 변조기(electro-optic modulator)를 이용하여 간섭계 외부에서 레이저를 변조하는 편광 광학 기반의 충천연색 광 스캐닝 홀로그래피 시스템이 제안되었다[3]. 2장에서 광 스캐닝 홀로그래피 카메라 시스템에 대해 소개하고 3 장에서는 전자-광 변조기 기반 충천연색 광 스캐닝 홀로그래피 카메라 시스템에 대해 논한다.

II. 광 스캐닝 홀로그래피 카메라 시스템

음향-광 변조기(acousto-optic modulator) 기반의 광 스캐닝 홀로그래피 카메라 시스템은 광 헤테로다인 검출 방식(optical heterodyne detection)을 사용한다. 아래 <그림 1>은 음향-광 변조기 기반의 광 스캐닝 홀로그래피 카메라 시

스템 구성도이다. 레이저(Laser)에서 나온 빔(beam)은 빔 분할기(BS1)를 통해 위쪽 경로와 아래쪽 경로로 나뉘지게 된다. 두 경로의 빔은 음향광변조기(AOM1,2)에서 서로 다른 변조주파로 변조되고 빔 확대기(BE1,2)를 통해 평면파(plane wave)가 된다. 위쪽 경로의 평면파는 렌즈(L1)를 통과하면서 구면파(spherical wave)가 되고 빔 분할기(BS2)에서 아래쪽 경로의 평면파와 간섭(interference)을 일으켜 <그림 2>와 같은 프레넬 존 윤대판(Fresnel zone plate)을 생성하게 된다.

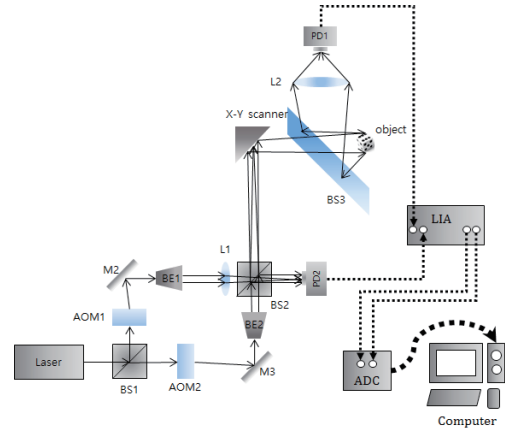


그림 1. 음향-광 변조기 기반의 광 스캐닝 홀로그래피 카메라 시스템 구성도 [1,2]

(BS's : beam splitter, AOM's : acousto-optic modulator, M's : mirror, BE's : beam expander, L's : lens, PD's : photodetector, LIA : lock-in amplifier, ADC : analog to digital converter)

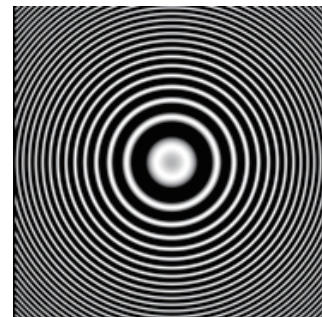


그림 2. 프레넬 존 윤대판(Fresnel zone plate)의 세기 패턴

빔 분할기(BS2)에서 생성된 두 경로의 프레넬 존 운대판 중에서 하나는 물체(object)를 스캔하는 물체광(object beam)으로 사용하고 나머지 하나는 참조광(reference beam)으로 사용한다. 물체광이 물체를 스캔하는 과정은 아래의 식 (1)과 같다[2].

$$I(x, y) = \iiint I_{FZP}(x', y', z; t) I(x + x', y + y', z) dx' dy' dz \quad \text{식 (1)}$$

식 (1)에서 I_{FZP} 는 프레넬 운대판의 세기이고 $I(x, y, z)$ 는 실제 물체에서 반사되는 빔의 세기 패턴을 나타낸다. 두 빔의 세기를 2차원 컨볼루션(convolution)한 결과가 물체를 2차원 스캐닝하여 반사된 빔의 세기를 의미한다. 스캐닝과정은 <그림 3>의 래스터 스캐닝 패턴(raster scanning pattern) 방식을 사용한다.

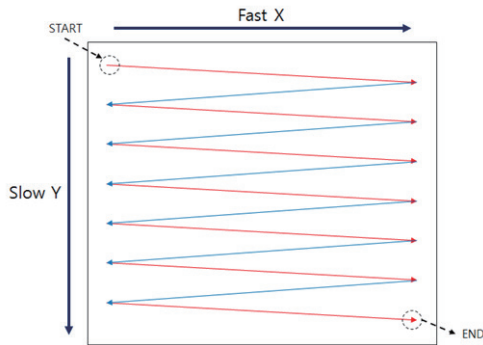


그림 3. 래스터 스캐닝 패턴(raster scanning pattern) [5]

<그림 3>에 나와 있듯이 래스터 스캐닝 패턴 방식은 x스캔 속도를 빠르게 하고 y스캔 속도는 느리게 하여 2차원 평면 전체를 스캔하는 방식이다. 스캔 과정에서 물체에서 반사된 빔을 빔 분할기(BS3)와 렌즈(L2)를 통해 집광하고, 광 검출기(PD1)를 통해 물체광을 전기신호로 변환하고 간섭계의 빔분할기(BS2)에서 나온 프레넬 존 운대판을 참조광으로 광 검출기(PD2)를 통해 전기신호로 변환한다. Lock-in 증폭기(LIA)에 물체광과 참조광의 전기신호를 입력하여 복조(de-modulation)과정을 거쳐 복소 홀로그래ムの 실수부와 허수부 데이터를 추출한다. 추출한 복소 홀로그래ムの 실수부와 허수부는 아날로그 디지털 변환기(ADC)를 통해 디지털 신호의 형태로 컴퓨터에 저장된다. 저장된 복소 홀로그래ムの 실수부와 허수부는 아래의 식 (2)와 같은 수치적 복원 과정을 거쳐 수치적 복원 데이터를 얻을 수 있다[2].

$$H_{complex} = |H| \exp(j \angle H) = i_i(x, y, z) + j i_q(x, y, z) \quad \text{식 (2)}$$

식 (2)의 $i_i(x, y, z)$ 는 동 위상 신호를 나타내고 $i_q(x, y, z)$ 는 직각 위상 신호를 나타낸다.

아래의 <그림 4>는 주사위 물체를 음향-광 변조기를 이용한 광 스캐닝 홀로그래피로 촬영하여 획득한 복소 홀로그래ムの (a) 실수부와 (b) 허수부 데이터 그리고 (c) 수치적 복원 결과이다. 또한, 광학적 복원을 위한 신호처리 과정을 거쳐 <그림 5>와 같은 홀로그래ム 복원 광학계를 구성하면 획득한 홀로그래ム 데이터를 공간 광 변조기(SLM)를 통해 공간 상에 광학적으로 복원할 수 있다. <그림 6>은 광학적 복원을 통해 공간상에 복원한 주사위 홀로그래ム 결과이다.

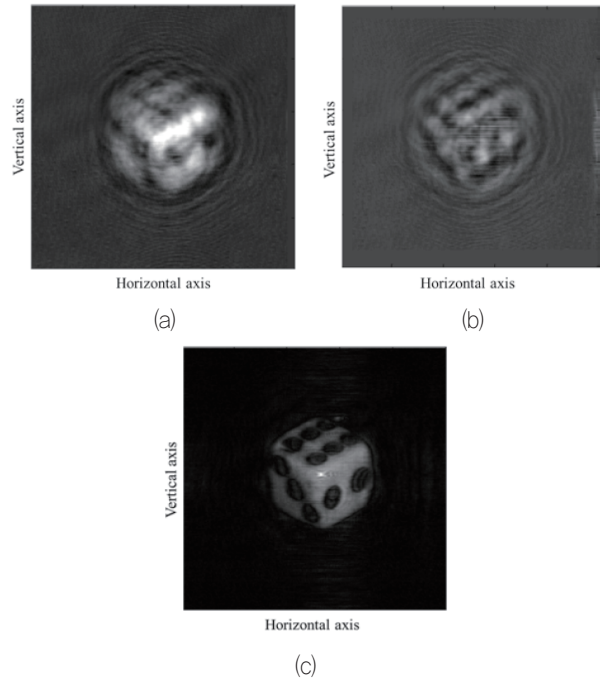


그림 4. 음향-광 변조기 기반의 광 스캐닝 홀로그래피 카메라를 이용해 촬영한 실제 주사위 물체의 복소 홀로그래ムの (a)실수부, (b)허수부, (c)수치적 복원 이미지 [2]

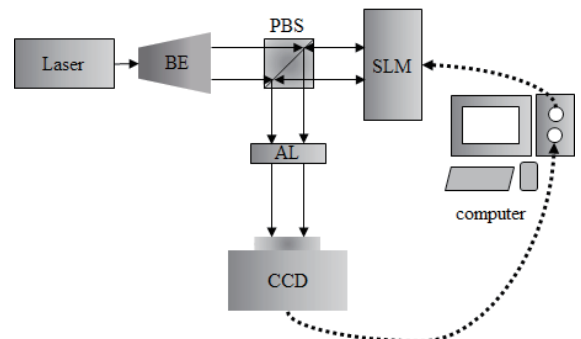


그림 5. 홀로그래ム 복원 광학계 [2]

(BE : beam expander, PBS : polarizing beam splitter, SLM : spatial light modulator, AL : analyzer, CCD : charge coupled device)

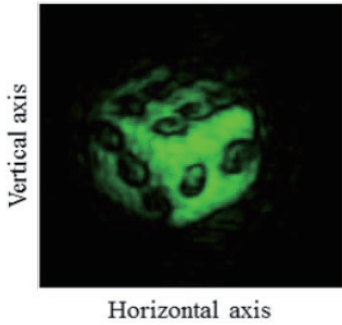


그림 6. 실제 주사위 물체 홀로그래피의 광학적 복원 결과 [2]

〈그림 5〉에서 홀로그래피 복원을 위해 공간 광 변조기(SLM)를 사용하였다. 공간상에 광학적으로 복원된 주사위 홀로그래피 영상을 CCD를 이용하여 초점 위치에서 다시 촬영한 결과가 〈그림 6〉이다.

III. 전자-광 변조기 기반의 광 스캐닝 홀로그래피 카메라 시스템

전자-광 변조기의 편광특성을 이용해 간섭계 외부에 변조기를 위치하는 방식으로 헤테로다인 변조가 가능하다. 〈그림 7〉은 전자-광 변조기를 이용한 광 스캐닝 홀로그래피이다.

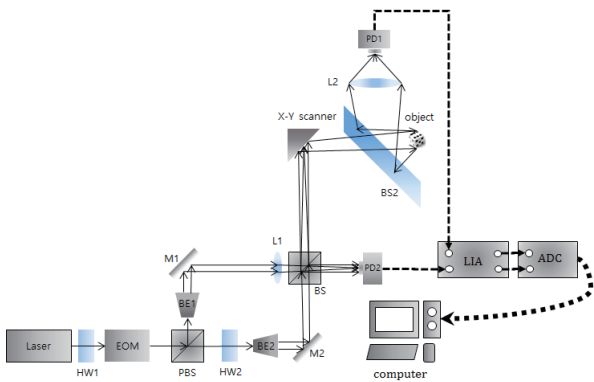


그림 7. 전자-광 변조기 기반의 광 스캐닝 홀로그래피 카메라 시스템 구성도 [5]

(HW's : half wave plate, EOM : electro-optic modulator, PBS : polarizing beam splitter, BE's : beam expander, M's : mirror, L's : lens, BS's : beam splitter, PD's : photodetector, LIA : lock-in amplifier, ADC : analog to digital converter)

〈그림 7〉을 참조하면 레이저는 전자-광 변조기의 유기복굴절축(induced birefringence axis)에 45도 방향으로 선 편광된

빔을 생성하여 전자-광 변조기에 입사시킨다. 따라서, 전자-광 변조기에서 출력되는 빔은 유기복굴절축으로 편광된 빛(S편광)과 유기복굴절축의 수직방향으로 편광된 빛(P편광)의 조합이다. 그 중 S편광에 대해서만 위상 변조(phase modulation)가 되고 P편광의 위상은 변조되지 않는다. 편광 빔 분할기(PBS)를 통해 P편광과 S편광을 2개의 경로로 나눠주고 두 경로의 편광 방향을 일치시켜주기 위해 반파장판(HW2)을 사용한다. 빔 확대기(BE1,2)를 사용하여 양쪽 경로의 빔 직경(beam diameter)을 키워줌과 동시에 평면파를 생성하고 렌즈(L1)를 사용하여 한 쪽 경로의 빔을 구면파로 만들어준 뒤에 빔 분할기(BS1)에서 구면파와 평면파를 간섭시켜 프레넬 존 운대판(Fresnel zone plate)을 생성한다. 이후의 물체를 스캔하고 데이터를 획득하는 과정은 음향-광 변조기 기반의 광 스캐닝 홀로그래피 카메라 시스템과 동일하다.

전자-광 변조기 기반의 광 스캐닝 홀로그래피 카메라 시스템을 총천연색으로 구성할 경우 적색, 녹색, 청색 레이저 광원에 대해 각각 서로 다른 간섭계를 구성할 필요 없이 공통의 간섭계를 사용하여 시스템 구성이 가능하다. 〈그림 8〉은 전자-광 변조기 기반의 총천연색 광 스캐닝 홀로그래피 카메라 시스템 구성도이고 RGB multiplexing unit, Color TD-FZP generation unit, Scanning unit, Space-integrating photo detection unit, De-multiplexing unit으로 크게 5부분으로 나눌 수 있다.

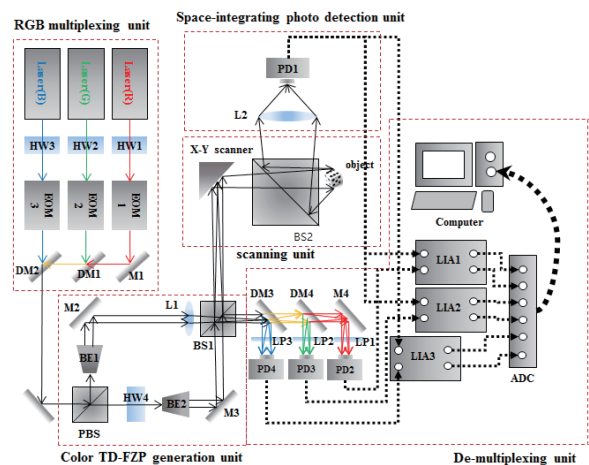


그림 8. 전자-광 변조기 기반의 총천연색 광 스캐닝 홀로그래피 카메라 시스템 구성도 [5]

(HW's : half wave plate, EOM's : electro-optic modulator, M's : mirror, DM's : dichroic mirror, PBS : polarizing beam splitter, BE's : beam expander, L's : lens, BS's : beam splitter, PD's : photodetector, LIA : lock-in amplifier, ADC : analog to digital converter)

〈그림 8〉의 RGB multiplexing unit에서 적색(R), 녹색(G), 청색(B) 레이저(Laser)는 각각 전자광학변조기(EOM1, 2, 3)에 의해 서로 다른 변조주파수로 변조되고 색 선별 거울(DM1, 2)과 거울(M1)에 의해 광학적으로 RGB색 다중화(RGB-multiplexing)과정을 거치게 된다. 이러한 다중화된 빔은 간섭계를 거쳐 칼라 프레넬 존 운대판(Color TD-FZP)을 생성한다. 2개의 경로로 생성된 칼라 프레넬 존 운대판 중에 하나는 물체광(object beam)이 되어 물체를 스캔하고 반사된 빔을 렌즈(L2)로 집광한 후에 광 검출기(PD1)를 이용하여 광 신호를 전기신호로 변환한다. 나머지 하나의 칼라 프레넬 존 운대판은 참조광(reference beam)이 되어 색 선별 거울(DM3, 4)과 거울(M4)을 이용하여 광학적으로 역다중화(de-multiplexing)과정을 거치게 된다. 각각의 칼라로 나뉜 RGB 참조광은 광 검출기(PD2, 3, 4)에서 전기신호로 변환되고 Lock-in 증폭기(LIA1, 2, 3)에서 복조(de-modulation) 과정을 거쳐 RGB복소 홀로그래프의 실수부와 허수부 데이터를 추출한다. 추출한 복소 홀로그래프의 실수부와 허수부 데이터는 아날로그 디지털 변환기(ADC)를 통해 디지털 신호의 형태로 컴퓨터에 저장된다. 〈그림 9〉은 Lock-in 증폭기의 복조(de-modulation) 과정을 나타낸 그림이다.

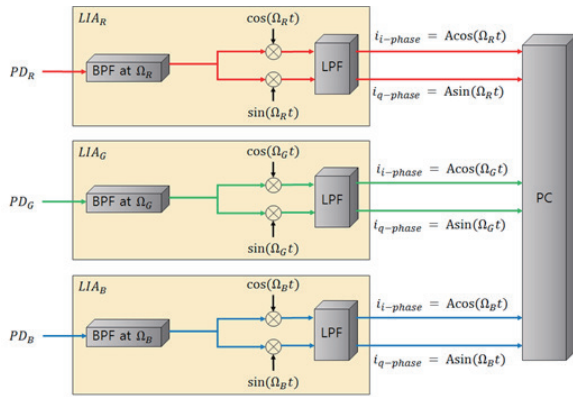


그림 9. Lock-in 증폭기의 복조(de-modulation) 과정 [5]

(PD's : photodetector, LIA's : Lock-in amplifier, BPF : bandpass filter, LPF : lowpass filter, PC : personal computer)

〈그림 9〉의 Ω 는 전자광학변조기의 변조주파수를 뜻하고 $i_{i\ phase}$ 는 동 위상 신호를 $i_{q\ phase}$ 는 직각 위상 신호를 의미한다.

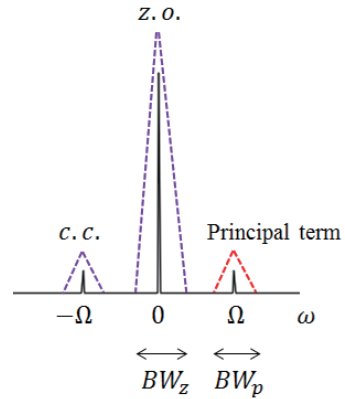


그림 10. Bandpass filter(BPF)의 개념도 [5]

〈그림 10〉은 Lock-in 증폭기 내부에 들어있는 bandpass filter(BPF)의 개념도를 나타낸다. $z.o.$ 는 물체광 신호의 0차 성분(zero order term)을 나타내고 $c.c.$ 는 켈레복소수 성분(complex conjugate term)을 나타낸다. 물체광 신호의 홀로그래프 신호 성분(principal term)만을 추출하기 위해 bandpass filter를 사용한다. Bandpass filter의 복조주파수 대역은 전자 광 변조기(EOM1, 2, 3)의 변조 주파수와 동일하고 대역폭(BW_p)은 아래의 식 (3)으로 계산할 수 있다[5].

$$BW_p = \frac{4\pi v_x NA}{\lambda_0} \quad \text{식 (3)}$$

식 (3)에서 v_x 는 x 방향 스캔 속도를 뜻하고, NA 는 〈그림 9〉의 렌즈(L2)의 개구수(numerical aperture)를 뜻한다. λ_0 는 사용한 레이저의 중심파장이다. 이 방법을 통해 추출한 신호에 90° 차이가 나는 반송파(carrier) 2종류를 인가하고 Lowpass filter(LPF)를 이용하여 복소 홀로그래프의 실수부와 허수부 신호를 추출한다. 추출한 RGB 복소 홀로그래프의 실수부와 허수부 신호들은 아날로그 디지털 변환기(ADC)를 통해 컴퓨터(PC)에 디지털 신호의 형태로 저장된다. 획득한 복소 홀로그래프는 아래의 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다[5].

$$\begin{aligned} & i_{n-i-phase} + j i_{n-q-phase} \\ &= \text{Re}[H_n(x, y)] + j \text{Im}[H_n(x, y)] = H_n(x, y) \\ & n = \{R, G, B\} \end{aligned} \quad \text{식 (4)}$$

식 (4)에서 $\text{Re}[\bullet]$ 는 복소수의 실수부를 뜻하고 $\text{Im}[\bullet]$ 는 복소수의 허수부를 뜻한다.

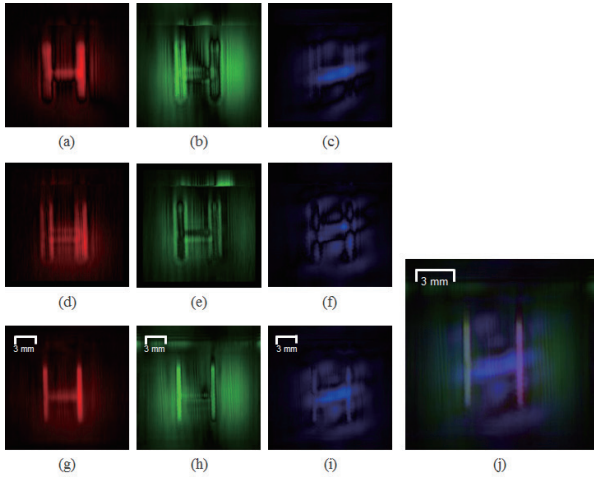


그림 11. 전자-광 변조기 기반의 광 스캐닝 홀로그래피 카메라를 이용해 촬영한 실제 투과형 H 물체의 복소 홀로그램 [5]

((a)적색, (b)녹색, (c)청색 실수부 이미지, (d)적색, (e)녹색, (f)청색 허수부 이미지, (g)적색, (h)녹색, (i)청색 수치적 복원 이미지 (j)RGB수치적 복원 이미지를 중첩하여 생성한 총천연색 홀로그램 이미지)

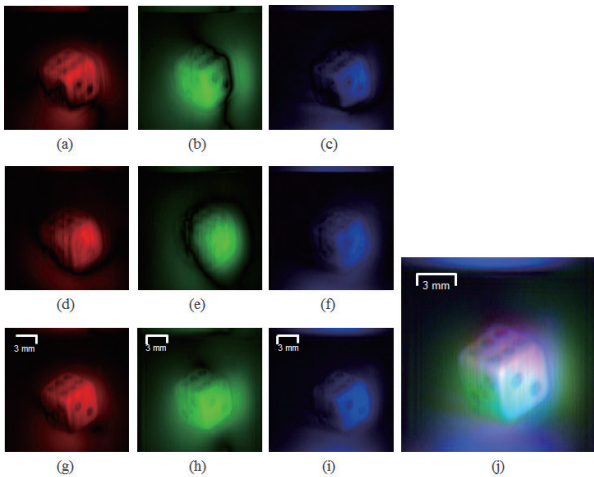


그림 12. 전자-광 변조기 기반의 광 스캐닝 홀로그래피 카메라를 이용해 촬영한 실제 주사위 물체의 복소 홀로그램 [4, 5]

((a)적색, (b)녹색, (c)청색 실수부 이미지, (d)적색, (e)녹색, (f)청색 허수부 이미지, (g)적색, (h)녹색, (i)청색 수치적 복원 이미지 (j)RGB수치적 복원 이미지를 중첩하여 생성한 총천연색 홀로그램 이미지)

〈그림 11〉은 전자-광 변조기 기반의 총천연색 광 스캐닝 홀로그래피 카메라 시스템을 이용하여 촬영한 실제 투과형 H 물체에 대한 복소 홀로그램의 실수부, 허수부, 수치적 복원 이미지 이고 RGB에 대한 수치적 복원 이미지를 중첩하여 얻은 총천연색 홀로그램 이미지이다. 스캔 영역은 가로, 세로 약 $15mm \times 15mm$ 이고 물체의 크기는 가로, 세로 약 $3mm \times 4mm$ 이다. RGB레이저의

중심파장은 $632nm, 532nm, 473nm$ 이고 전자 광 변조기(EOM)의 변조 주파수는 각각 $20kHz, 15kHz, 10kHz$ 이다. 간섭계 내부에 위치한 렌즈(L1)의 초점거리는 $250nm$ 이다.

〈그림 12〉는 전자-광 변조기 기반의 총천연색 광 스캐닝 홀로그래피 카메라 시스템을 이용하여 촬영한 실제 주사위 물체에 대한 복소 홀로그램의 실수부, 허수부, 수치적 복원 이미지 이고 RGB에 대한 수치적 복원 이미지를 중첩하여 얻은 총천연색 홀로그램 이미지이다. 주사위 물체의 크기는 $3mm \times 3mm \times 3mm$ 이고 나머지 실험 조건은 〈그림 12〉과 동일하다. 〈그림 12〉의 (j)주사위 RGB홀로그램의 수치적 복원 중첩 이미지에서 흰색 바탕에 검은색 점으로 된 주사위 물체가 표현된 것을 확인할 수 있다. 하지만 RGB 색의 조합이 완벽하지 않기 때문에 부분적으로만 주사위의 흰색바탕이 확인되는 것을 알 수 있다. 이것의 원인은 RGB광원이 광학계를 통과하면서 색 수차(chromatic aberration)를 겪게 되기 때문이다. 이러한 색 수차를 해결하는 것이 앞으로 총천연색 광 스캐닝 홀로그래피 카메라 시스템의 주요해결과제 중 하나이다.

IV. 결론

본 고에서는 광 스캐닝 홀로그래피 카메라 시스템에 대해 개관하고 음향-광변조기 기반의 광 스캐닝 홀로그래피와 전자-광변조기 기반의 광 스캐닝 홀로그래피 시스템을 설명하였다. 총천연색 광 스캐닝 홀로그래피를 이용하여 한 번의 스캔을 통해 반사형 물체의 RGB 복소 홀로그램을 스페클 없이 획득할 수 있음을 보였다.

Acknowledgement

본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 대학 ICT연구센터육성지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2015-R0992-15-1008).

본 연구는 Giga Korea 사업의 디지털 홀로그래픽 테이블탑형 단말 기술 개발 사업[GK14D0100]의 지원에 의해 수행 되었습니다.

참고 문헌

[1] T.-C. Poon, "Scanning holography and two-dimensional image processing by acousto-optic two-pupil synthesis,"

J. Opt. Soc. Am. A 2(4), 521–527 (1985).

- [2] Y. S. Kim, T. Kim, S. S. Woo, H. Kang, T.-C. Poon, and C. Zhou, “Speckle-free digital holographic recording of a diffusely reflecting object,” Opt. Express 21, 8183–8189 (2013).
- [3] H. Kim, Y. S. Kim, T. Kim, “Full-color optical scanning holography with common Red, Green and Blue channels,” Appl. Opt. 50, B81–B87 (2016).
- [4] 조광훈, 김하얀, 김태근, “반사형 총천연색 광 스캐닝 홀로그래피,” 한국광학회 2016 Photonics Conference T1D-V-2 (2016)
- [5] 조광훈, “단일 채널 디지털 역다중화 방식을 이용한 총천연색 광 스캐닝 홀로그래피,” 세종대학교 대학원 광 공학과 석사논문, 12월 (2016).

약 력



조 광 훈

2015년 세종대학교 공학사
2017년 세종대학교 공학석사
관심분야: 홀로그래피, 디지털 홀로그래피



김 태 근

1996년 경희대학교 학사
1997년 Virginia Tech. 석사
2000년 Virginia Tech. 박사
2001년~현재 세종대학교 교수
2007년~2008년 M.I.T., RLE 초빙과학자
한국광학회, OSA, SPIE 회원,
App. Opt. topical editor.
2012년~2013년 문화체육관광부,
문화기술기획책임자
관심분야: 홀로그래피, 디지털 홀로그래피