

2009年 08月

碩士學位論文

디지털 홀로그램의 자동초점 조절 및 재생 알고리즘 연구

朝鮮大學校 大學院

光 技 術 工 學 科

韓 星

디지털 홀로그램의 자동초점 조절 및 재생 알고리즘 연구

Study on Reconstruction and Autofocusing Control Algorithm
of a Digital Hologram

2009年 08月

朝鮮大學校 大學院

光 技 術 工 學 科

韓 星

디지털 홀로그램의 자동초점 조절 및 재생 알고리즘 연구

指導教授 金 珍 泰

이 論文을 工學碩士學位申請 論文으로 提出함

2009年 08月

朝鮮大學校 大學院

光 技 術 工 學 科

韓 星

韓 星의 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 朝鮮大學校 教授 金 玆 秀 印

審 查 委 員 朝鮮大學校 教授 金 珍 泰 印

審 查 委 員 朝鮮大學校 教授 朴 時 賢 印

2009年 08月

朝鮮大學校 大學院

목 차

목차	i
표 목차	iii
그림 목차	iv
Abstract	vi
제1장 서론	1
제2장 디지털 홀로그램 생성 및 측정원리	3
제1절 디지털 홀로그램 영상 측정원리	3
제2절 디지털 홀로그램 생성을 위한 실험도	5
제3장 디지털 홀로그램 재생이론 및 방법	14
제1절 프레넬 재생방법	17
제2절 프레넬 컨벌루션 재생방법	21
제4장 측정된 디지털 홀로그램 재생 및 자동초점 제어 알고리즘 비교 분석	23
제1절 주파수 영역 필터링 알고리즘	23
제2절 프레넬 방법을 이용한 디지털 홀로그램의 재생	28
제3절 프레넬 컨벌루션 방법을 이용한 디지털 홀로그램의 재생	35

제4절 자동초점 제어 알고리즘 비교 분석	41
제5장 결론 및 향후 계획	47
감사의 글	48
참고문헌	49

표 목 차

표 1. 실험에 사용된 CCD 사양	7
표 2. USAF 1951 해상도 시험 표적 사양	9
표 3. 프레넬 방법을 이용한 수직방향의 재생거리에 따른 상 크기	33
표 4. 프레넬 방법을 이용한 수평방향의 재생거리에 따른 상 크기	33
표 5. 프레넬 컨벌루션 방법을 이용한 수직방향에서 재생거리에 따른 상의 크기	39
표 6. 프레넬 컨벌루션 방법을 이용한 수평방향에서 재생거리에 따른 상의 크기	39

그 립 목 차

그림 1. 디지털 홀로그램 생성을 위한 실험모식도	6
그림 2. USAF 1951 해상도 시험 표적	8
그림 3. USAF 1951의 그룹 0, 원소 3의 주기형태	9
그림 4. 비축(off-axis) 홀로그램 측정방법	10
그림 5. 디지털 홀로그램 기록 시스템	11
그림 6. CCD에 기록된 홀로그램에서 기준파 잡음 제거를 위한 실험모식도	12
그림 7. 디지털 홀로그램 생성을 위한 실험장치 사진	13
그림 8. 디지털 홀로그램 좌표계	14
그림 9. (a)홀로그램 평면 좌표와 (b)주파수 평면 좌표	19
그림 10. 홀로그램에서 생성된 이미지의 실상, 허상, 영차	23
그림 11. 주파수 영역 필터링 알고리즘 흐름도	24
그림 12. 잡음을 제거한 물체의 홀로그램	25
그림 13. 재생된 홀로그램 이미지	25
그림 14. 주파수 영역 필터링 과정	26
그림 15. 주파수 영역 필터링을 수행한 물체의 재생 이미지	27
그림 16. USAF 1951 시험 표적의 그룹 0, 원소 2의 위치	28
그림 17. 재생을 위한 잡음이 제거된 물체 홀로그램	29
그림 18. 프레넬 재생방법 알고리즘 흐름도	29
그림 19. 프레넬 방법을 이용한 재생거리에 따른 물체 상의 대비변화	31
그림 20. 프레넬 방법으로 재생된 상의 수직방향 화소범위에 따른 대비 값 변화	32
그림 21. 프레넬 방법으로 재생된 상의 수평방향 화소범위에 따른 대비 값 변화	32
그림 22. 프레넬 컨벌루션 재생방법 알고리즘 흐름도	35
그림 23. 프레넬 컨벌루션 방법을 이용한 재생거리에 따른 물체 상의 대비변화	37

그림 24. 프레넬 컨벌루션 방법으로 재생된 상의 수직방향 화소범위에 따른 대비 값 변화	38
그림 25. 프레넬 컨벌루션 방법으로 재생된 상의 수평방향 화소범위에 따른 대비 값 변화	38
그림 26. 프레넬 방법에서 푸리에 스펙트럼 자동초점 알고리즘이 적용된 재생거리 에 따른 초점 값	42
그림 27. 프레넬 컨벌루션 방법에서 푸리에 스펙트럼 자동초점 알고리즘이 적용된 재생거리에 따른 초점 값	43
그림 28. 프레넬 방법에서 임계 절대 그래디언트 자동초점 알고리즘이 적용된 재 생거리에 따른 초점 값	44
그림 29. 프레넬 컨벌루션 방법에서 임계 절대 그래디언트 자동초점 알고리즘이 적용된 재생거리에 따른 초점 값	45

Abstract

Study on Reconstruction and Autofocusing Control Algorithm of a Digital Hologram

by Xing Han

Advisor : Prof. Jin-Tae Kim, Ph.D.

Department of Photonic Engineering,
Graduate School of Chosun University

This thesis concerns developments of reconstruction and autofocusing control algorithm methods by using matlab codes. For these purposes a hologram of USAF 1951 test target is recorded in CCD by using Mach-Zehnder interferometer and Labview software. For the reconstruction of the hologram we used two different reconstruction algorithms such as Fresnel and Fresnel convolution. Frequency image filterings have been done to process hologram reconstruction and used several hologram planes. These hologram distances have been reconstructed by checking the image contrasts of the reconstructed holograms with Fresnel spectrum and threshold absolute gradient methods for autofocusing algorithm developments. From these reconstructed image the absolute sizes of the elements of USAF 1951 test target were compared with those of the measured sizes, which matched well each other. Thus the hologram measuring system is calibrated with this method and we confirmed the developed reconstruction algorithms such as Fresnel and Fresnel convolution are working well. In the future we have plans to develop modified holography microscopy system to measure magnified cell image and characterize the cell.

제1장 서론

물체의 상을 보기 위한 사진 기술은 물체에서 산란된 빛을 렌즈를 통해 필름에 빛의 강도를 기록하여 삼차원 물체 형상이 아닌 이차원 영상을 재현하는 기술이다. 그러나 홀로그래피(Holography)는 간섭과 회절원리를 이용하여 기준파와 물체파에 의해 생성되는 간섭무늬를 필름 혹은 charge coupled device (CCD)에 기록하는 기술로, 홀로그래피를 이용하여 기록한 간섭무늬로부터 진폭과 위상 정보를 추출하여 물체의 삼차원 영상을 구현할 수 있어 최근 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

1948년에 톰슨-휴스턴사(Thomson-Houston Company) 연구소에 재직한 영국의 물리학자 데니스 게이버(Dennis Gabor)가 홀로그래피 실험을 최초로 수행하였다. 그는 우선 물체로부터 산란된 물체파와 가간섭성을 가진 기준파의 상호작용에 의해 생긴 간섭무늬를 기록하여 이렇게 얻어진 간섭무늬를 홀로그램(Hologram)이라고 하였다. 홀로그램으로부터 물체를 재생(Reconstruction)하기 위하여 홀로그램에 홀로그램 생성시 사용한 기준파를 조사하여 삼차원 영상정보를 획득하였다.

1960년 결맞음성과 방향성이 좋은 레이저가 발명되면서 홀로그래피의 발전에 중대한 기여를 하였다. 1962년 미국 미시간(Michigan)대학에 재직한 리스(E. N. Leith)와 우파트닉스(J. Upatnieks)는 He-Ne 레이저를 사용하여 기존의 축상 홀로그래피 기술을 발전시킨 비축 홀로그래피 기술을 개발하였다. 이러한 기술은 기존의 쌍둥이 상 제거 기술로 현재 많이 이용되고 있다.

디지털 홀로그래피는 홀로그래피 기술을 컴퓨터 기술과 디지털 광학 기술을 결합하여 기존에 사용한 필름대신 CCD 카메라에 기록하는 기술로 굿만(Goodman)에 처음으로 재현되고 샤나스(Schnars)에 의해 최초로 CCD에 홀로그램이 기록되었으며, CCD 성능의 발전과 컴퓨터 저장 능력의 개발을 통하여 많은 발전이 이루어졌다. 전통적인 홀로그래피에 비해 디지털 홀로그래피는 렌즈를 사용하지 않기 때문에 수차, 잡음 및 기록과정 중에 필름 비선형 등의 영향이 없고 전체과정이 모두 컴퓨터에서 처리가 되어 필름을 사용하는 홀로그래피 기술에 비해 매우 편리하다. 이러한 기술은 현재 물체변형, 유속가시화, 정보저장 등에 간섭계 기술을 접목하여 많이 응용되고 있으며, 이를 현미경과 접목하여 삼차원 셀 측정 등에 사용되는 기

술로 각광을 받고 있다^[1-5].

본 논문에서는 디지털 홀로그래피의 생성을 위한 실험설계 및 CCD에 기록된 물체 영상정보에 대하여 개발된 수치적 알고리즘을 통해 물체 영상의 재생에 관한 연구를 수행 하였다. 또한, 실험을 통해 얻어진 물체의 디지털 홀로그램을 프레넬 컨벌루션 방법, 프레넬 방법을 적용하여 재생하고 영상의 대비가 가장 좋은 재생거리를 찾기 위하여, 프레넬 스펙트럼 및 절대임계 그래디언트 방식을 적용하여 자동초점 알고리즘 개발을 수행하였다. 실험적으로 홀로그램을 기록하기 위해 마하젠더 형태의 간섭계가 사용되고, LabVIEW를 사용하여 CCD에 기록되었으며 기록된 홀로그램은 MATLAB 프로그램을 사용하여 컴퓨터에서 분석하였다. 개발된 알고리즘의 정확성을 확인하기 위하여 정밀 시험 표적(USAF 1951)을 사용하여 실험상으로 얻은 수치와 비교 하였다. 생성된 홀로그램은 필터링 작업 등을 통하여 허상과 영차광이 제거되고 상의 대비를 비교하여 뚜렷한 실상을 재생하였다. 재생된 물체 상의 크기는 주어진 정밀 시험 표적의 크기와 잘 일치함을 알 수 있었다.

제 2장에서는 본 연구에서 진행한 디지털 홀로그램 생성 및 측정원리에 대해 서술하였으며, 제 3장에서는 디지털 홀로그램 재생을 위한 프레넬과 프레넬 컨벌루션 방법에 대해 소개 하였다. 제 4장에서는 앞서 논술한 방법을 사용하여 기록된 디지털 홀로그램 재생 및 자동초점 제어에 대해 비교 분석 하였다. 마지막으로 제 5장에서 결론과 향후 계획에 대해 제시하였다.

제2장 디지털 홀로그래프 생성 및 측정 원리

제1절 디지털 홀로그래프 영상 측정 원리

디지털 홀로그래피는 시준된 레이저 광원에서 나온 빔을 빔 분할기(BS)를 이용하여 두 경로의 빔으로 나눈 후 하나는 물체를 통과하여 돌아오는 물체파가 되고, 다른 하나는 거울에 반사되어 기준파가 된 두 경로의 다른 빔을 결합하여 얻은 간섭무늬를 CCD 에 위상과 진폭 정보를 홀로그래프로 기록하는 기술이다.

이러한 간섭현상은 두 개 이상의 파동이 만나 간섭을 일으키는 현상으로 위상차에 따라 보강 혹은 상쇄간섭이 나타난다. 물체파는 광원에서 나온 빔이 물체에서 통과 혹은 산란된 물체파의 복소 진폭은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$U_o(x,y) = A_o(x,y)\exp[i\phi_o(x,y)] \quad (2.1.1)$$

여기에서 A_o 는 진폭이고, ϕ_o 는 위상이다.

기준파는 평면파 혹은 구면파 등으로 표현할 수 있으며 평면파의 경우 아래의 2.1.2 방정식으로 표현할 수 있다.

$$U_r(x,y) = A_r(x,y)\exp[i\phi_r(x,y)] \quad (2.1.2)$$

식 2.1.2에서 A_r 는 진폭이고, ϕ_r 은 위상이다.

CCD에 기록되는 정보는 물체파와 기준파가 결합하여 생성된 간섭무늬를 기록하기 때문에 두 개의 파가 결합된 간섭무늬에 대한 빛의 세기 분포는 아래의 2.1.3 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} I &= |U_o + U_r|^2 \\ &= (U_o + U_r)(U_o + U_r)^* \\ &= (U_o + U_r)(U_o^* + U_r^*) \\ &= U_o U_o^* + U_r U_r^* + U_o U_r^* + U_o^* U_r \\ &= A_o^2 + A_r^2 + U_o U_r^* + U_o^* U_r \end{aligned} \quad (2.1.3)$$

2.1.3 공식에서 A_o 와 A_r 은 각각 물체파와 기준파의 진폭이며, 강도 I 는 두 파가 결합되어 생성된 물체 정보를 포함하고 있는 빛의 세기이다. 기준파는 구면파나 평면파로 만들 수 있고, 구면파의 경우 재생된 허상과 실상의 위치와 크기에 영향을 주기 때문에 실험의 간결성과 정확성을 높이기 위해 본 연구에서는 평면파를 기준파로 사용하여 실험을 하였다^[4,5,6,11].

제2절 디지털 홀로그래프 생성을 위한 실험도

홀로그래프의 재생을 위해서는 우선 실험을 통해 특정 물체에 대한 홀로그래프 정보를 얻어야 한다. 이렇게 홀로그래프 정보를 얻기 위한 실험 과정이 바로 디지털 홀로그래프의 기록과정이라 할 수 있다. 레이저빔을 빔 분할기를 통해 두 경로로 빔을 나눈 후 하나의 빔은 물체에서 발산되어 물체파를 이루고 다른 하나는 물체파와 다른 경로를 가지며 거울에만 반사된 기준파로 구성한다. 두 경로의 빔을 빔 분할기를 사용하여 결합시키며, CCD표면에서 간섭무늬를 형성하고, 이때의 간섭무늬가 바로 홀로그래프이다.

본 연구에서는 물체에 대한 홀로그래프를 생성하기 위하여 그림 1과 같은 마하-젠더 간섭계 시스템을 사용하였다^[7].

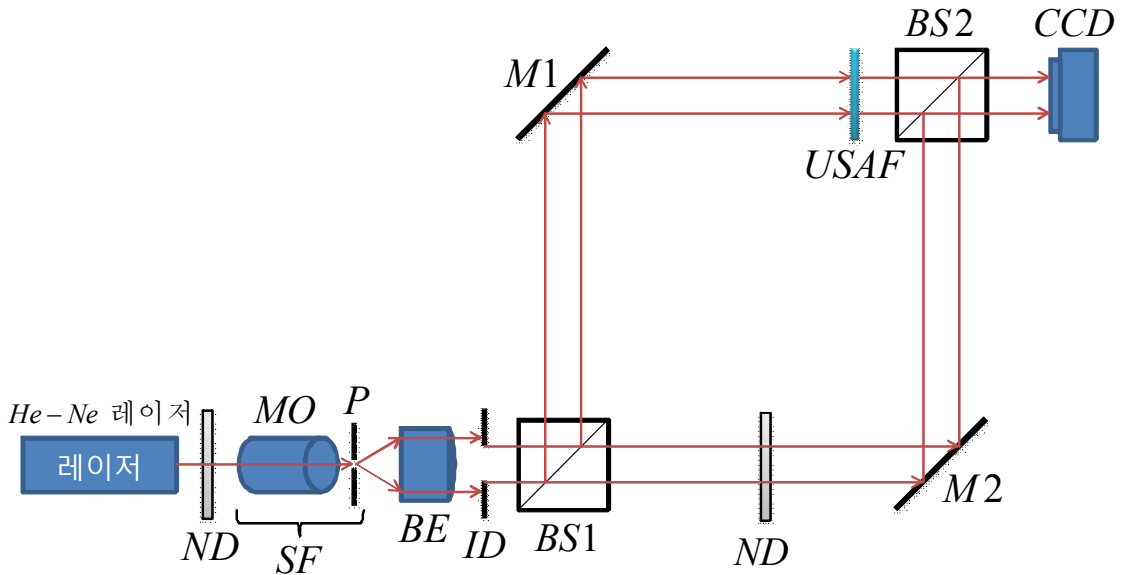


그림 1. 디지털 홀로그램 생성을 위한 실험 모식도

ND : ND 필터

MO : 대물렌즈

P : 핀홀

SF : $(MO+P)$ 공간 필터

BE : 빔 확대기

ID : 조리개

$BS1, BS2$: 빔 분할기

$M1, M2$: 거울

$USAF$: $USAF$ 시험 표적

CCD : 전하 결합 소자

그림 1에서 레이저로부터 나온 빔은 레이저의 공간모드를 좋게 하기 위하여 공간 필터를 지난 후 확대되고 시준된 레이저 빔을 얻기 위하여 빔 확대기를 통과 시킨다. 이렇게 생성된 평행광을 $BS1$ 을 이용하여 두 경로로 나누어 물체로 사용된

USAF 표적에 통과시키고, 다른 빔은 기준광으로 물체를 통과하지 않고 빔 분할기로 보내진다. 빔 분할기 BS2에서 중첩된 물체파와 거울에 반사된 기준파가 간섭되어 물체의 정보에 따른 진폭과 위상정보를 CCD에 기록한다. 실험에 사용한 광원은 632.8 nm의 파장을 가지는 He-Ne 레이저이다. ND는 CCD에 들어가는 빔의 세기가 너무 강할 경우 CCD에 기록되는 물체정보인 간섭무늬의 식별이 어렵기 때문에 빔의 세기를 줄이기 위해 사용하였다. 물체로는 USAF 1951 시험 표적을 사용하였으며, 이 표적은 정확히 알려진 선폭들로 구성되어 광학계의 정밀보정을 위해 사용되는 시험 표적이다.

표 1. 실험에 사용된 CCD 사양

모 델	Pulnix TM-200 CCD 카메라
이미저	1/2" Interline transfer CCD, HAD type
화소수	768 (H) x 494 (V)
화소 크기	8.4 μm x 9.8 μm
주 사	525 lines EIA
동기화	Internal/External auto switch $f_H=15.734 \text{ kHz} \pm 5\%$, $f_V=59.94 \text{ Hz} \pm 5\%$

본 실험에서 사용된 CCD (Pulnix TM-200)는 NTSC RS 170 타입이며, 768 (H) \times 494 (V) 화소를 가진다. 각각의 화소크기는 8.4 μm \times 9.8 μm 이고, CCD의 전체 크기는 45.8 mm (W) \times 39.4 mm (H) \times 66.3 mm (L)이다^[8].

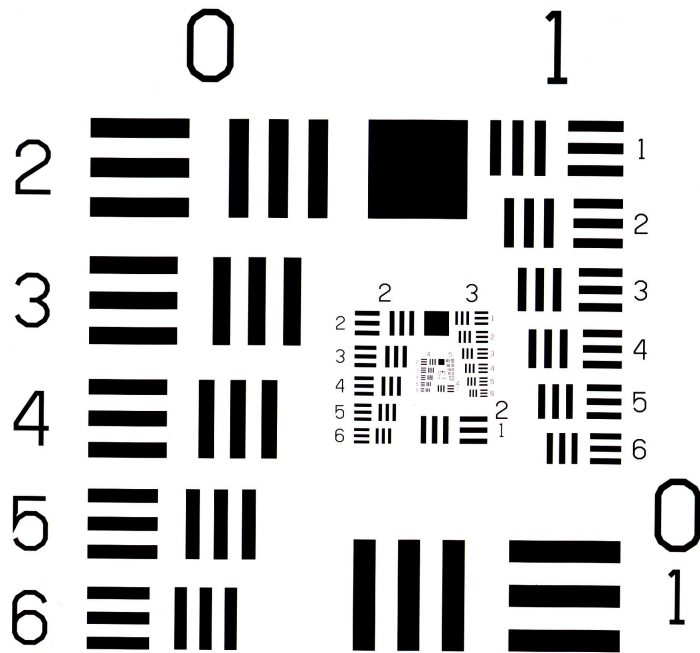


그림 2. USAF 1951 해상도 시험 표적

본 실험에서 사용한 USAF 1951 시험 표적은 그림 2에 도시한 것과 같다^[9]. USAF 1951은 정밀도가 높은 광학계 평가용 시험 표적으로 그룹과 그룹 내 원소로 이루어진다. 예를 들면 그룹 0은 1부터 6까지 원소로 분할된다. 위 그림에서 가장 해상도가 낮은 그룹 0은 6개의 원소로 구성되어 있으며 가장 해상도가 높은 그룹 4 역시 6개 원소로 구성되어 있음을 알 수 있다. 각 원소는 동일하게 공간에서 분리된 3개의 수평 및 3개의 수직 막대기들로 구성된다. 표 2에서와 같이 정확히 알려진 공간주파수 1.26 (lines/mm)을 사용하여 그룹 0, 원소 3의 그림 3에서 보인 바와 같이 주기 ($\lambda = 794 \mu m$)를 얻을 수 있으며 이 값으로부터 검은 수직 막대기의 선폭 ($\frac{\lambda}{2} = 397 \mu m$)을 얻을 수 있다.



그림 3. USAF 1951의 그룹 0, 원소 3의 주기형태

표 2. USAF 1951 해상도 시험 표적 사양

그룹	원소	공간주파수	선폭(μm)	그룹	원소	공간주파수	선폭(μm)
0	1	1.00	500	4	1	16.00	31.3
	2	1.122	445		2	17.96	27.8
	3	1.260	397		3	20.16	24.8
	4	1.414	354		4	22.63	22.1
	5	1.587	315		5	25.40	19.7
	6	1.782	281		6	28.51	17.5
1	1	2.000	250	5	1	32.00	15.6
	2	2.245	223		2	35.92	13.9
	3	2.520	198		3	40.32	12.4
	4	2.828	177		4	45.25	11.0
	5	3.174	157		5	50.80	9.84
	6	3.564	140		6	57.02	8.77
2	1	4.00	125.00	6	1	64.00	7.81
	2	4.49	111.36		2	71.84	6.96
	3	5.04	99.21		3	80.63	6.20
	4	5.66	88.39		4	90.51	5.52
	5	6.35	78.75		5	101.6	4.92
	6	7.13	70.15		6	114.0	4.38
3	1	8.00	62.50	7	1	128.0	3.91
	2	8.98	55.68		2	143.7	3.48
	3	10.08	49.61		3	161.3	3.10
	4	11.31	44.19		4	181.0	2.76
	5	12.70	39.37		5	203.2	2.46
	6	14.25	35.08		6	228.1	2.19

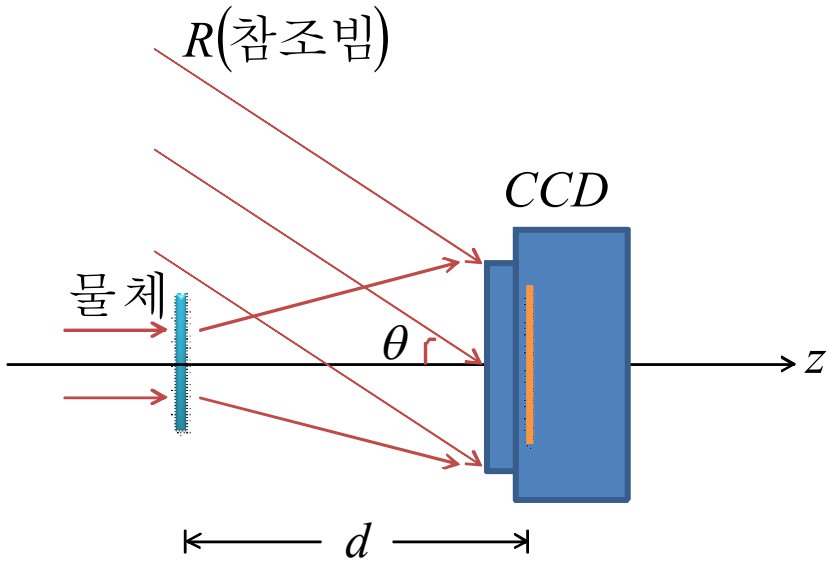


그림 4. 비축(off-axis) 홀로그램 측정방법

디지털 홀로그래피를 얻는 방법으로 기준파와 물체파가 겹치는 각도가 수도 이내로 제한된 비축(off-axis) 홀로그램과 기준파와 물체파가 평행인 축상(in-line) 홀로그램이 있다. 그림 4에서 R 은 기준파이며, d 는 물체와 CCD사이의 거리 (즉, 기록거리) 물체파와 기준파사이의 각 θ 의 크기는 매우 작다. 본 연구에서는 영차, 실상과 허상이 공간적으로 모두 분리되어 재생되는 비축 홀로그램방법을 사용하였다. 그러므로 물체의 실상은 허상과 영차 세 부분으로 나뉘어져 있으므로 필터링을 통해 허상과 영차를 생략해 주면 뚜렷한 물체의 실상을 얻을 수 있다.

각 θ 는 매우 작아서 영차, 실상과 허상이 부분적으로 중첩되어 보인다. 이 각 θ 는 중첩된 상들에 대해 영향을 준다. 그림 1에서 M2를 조절하여 θ 를 변화시킬 수 있지만 그 변화 값 또한 매우 작아 미세조절이 필요하다.

물체파와 기준파가 결합된 합성파의 CCD에 얻어진 물체 영상정보에 대해 아래의 그림 5와 같이 CCD 모니터와 컴퓨터로 확인이 가능하다. 이때 물체렌즈를 미세조절 하여 물체의 영상정보가 뚜렷하게 보이는 재생거리를 찾을 수 있다.

CCD와 컴퓨터를 연결하고 상용 프로그램인 LabVIEW를 이용하여 CCD에서 얻어진 물체의 영상정보를 확인한다. 이 프로그램을 이용하여 CCD의 물체영상정보를 확인과 동시에 영상정보에 대해 fast fourier transform (FFT)를 하여 얻어진 정보

를 LabVIEW 프로그램을 이용하여 그림 파일인 png파일로 저장한다. 이러한 일련의 과정을 통해 물체에 대한 홀로그래ムの 영상정보를 수집하고 파일로 저장할 수 있다.

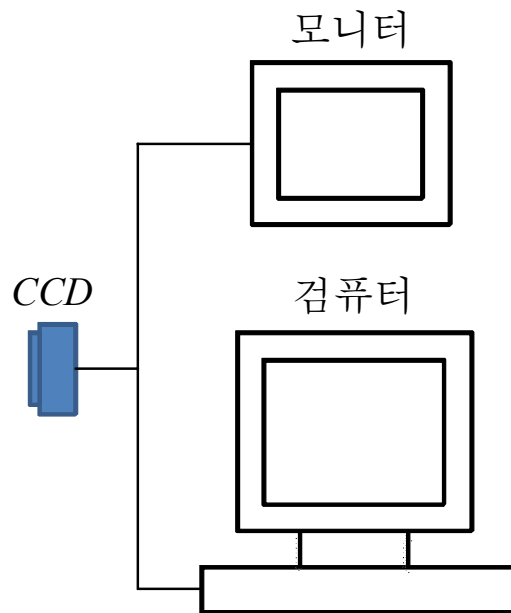


그림 5. 디지털 홀로그래ム 기록 시스템

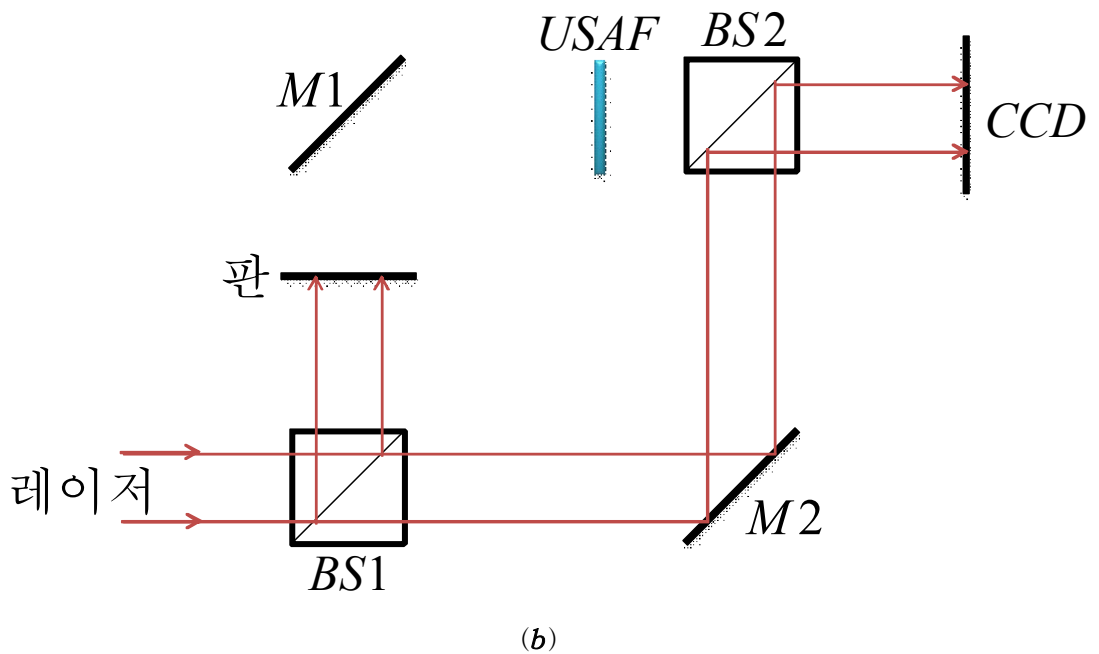
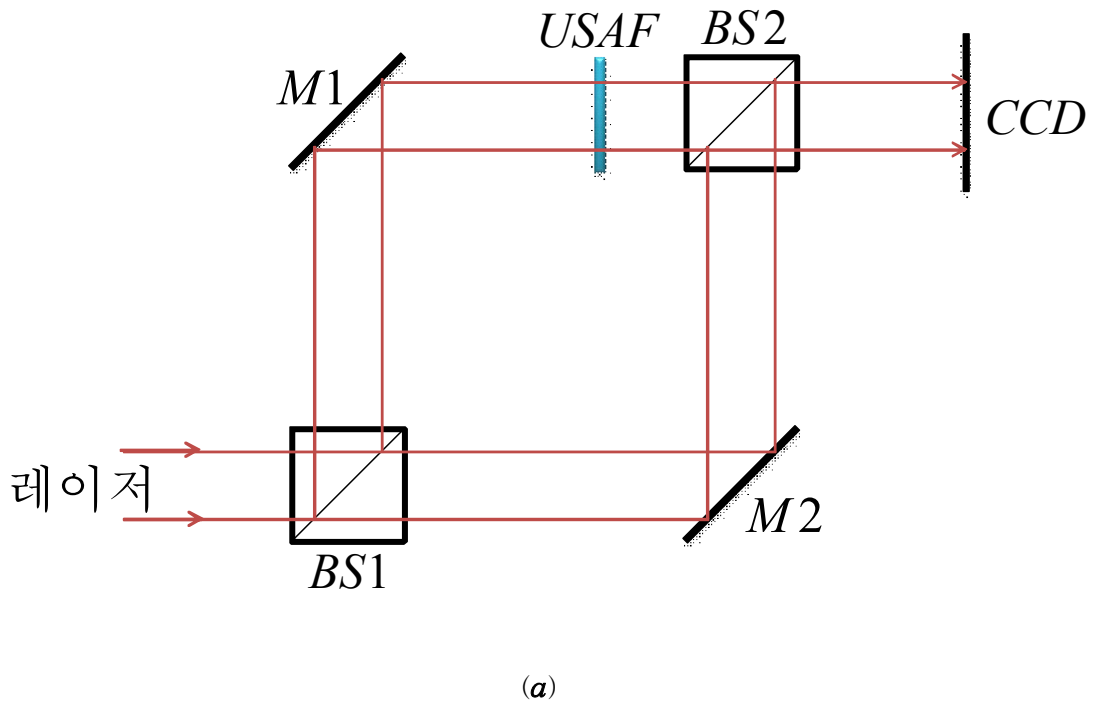


그림 6. CCD에 기록된 홀로그래프에서 기준파 잡음 제거를 위한 실험 모식도

그림 6(a)의 간섭계를 통한 물체파와 기준파를 결합하여 CCD에 물체 영상정보를 얻을 수 있으며, 공기 중과 광학부품들을 거치면서 많은 잡음이 발생한다. 이 상태에서 얻은 물체 영상정보를 사용하여 디지털 홀로그래를 재생하면 많은 오차를 초래하므로 잡음 제거가 필요하다. 잡음을 제거하기 위하여 그림 6(b)와 같이 물체를 투과하는 빛을 차단하여 기준파에 대한 영상정보만을 수집한다. 여기서 두 데이터의 겹치는 정보는 잡음이며 수치해석 프로그램인 MATLAB을 사용하여 두 정보에서 겹치는 부분을 제거한다. 이러한 방법을 이용하면 물체 영상정보에서 잡음이 제거된 뚜렷한 물체 영상정보만을 얻을 수 있다. 상술한 그림 1의 디지털 홀로그래 생성을 위한 실험모식도에 근거하여 실제로 광학장비들을 그림 7과 같이 정렬하여 본 연구의 실험을 수행하였다.

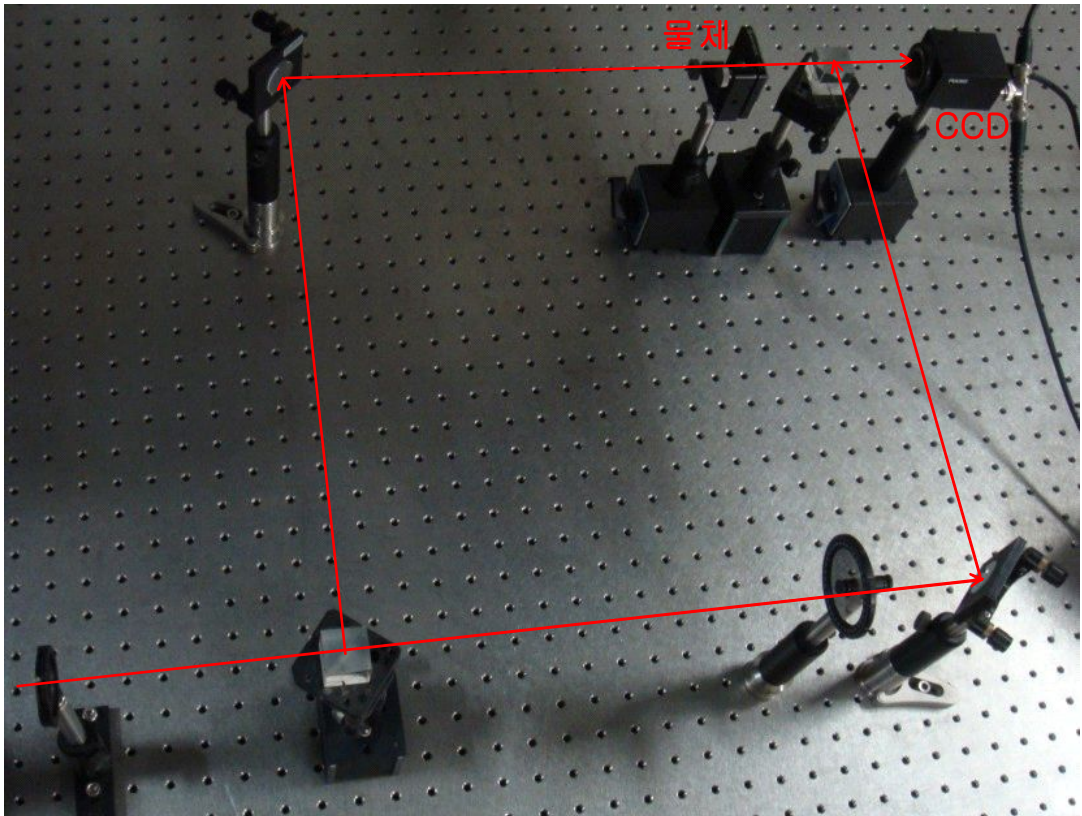


그림 7. 디지털 홀로그래 생성을 위한 실험장치 사진

제 3 장 디지털 홀로그램 재생이론 및 방법

본 장에서는 디지털 홀로그램의 재생이론 및 방법에 대해 서술하며, 디지털 홀로그램을 재생하기 위하여 레일리-죌머펠드 회절을 이용한 프레넬과 프레넬 컨벌루션 재생방법을 소개한다.

디지털 홀로그램을 수치적 재생을 설명하기 위하여 그림 8에서와 같이 물체공간 평면(x, y), 홀로그램 평면(ξ, η), 상 평면(x', y')을 고려하면 물체공간과 상공간은 홀로그램 평면에서 각각 d' 과 d 간격만큼 떨어져 있다.

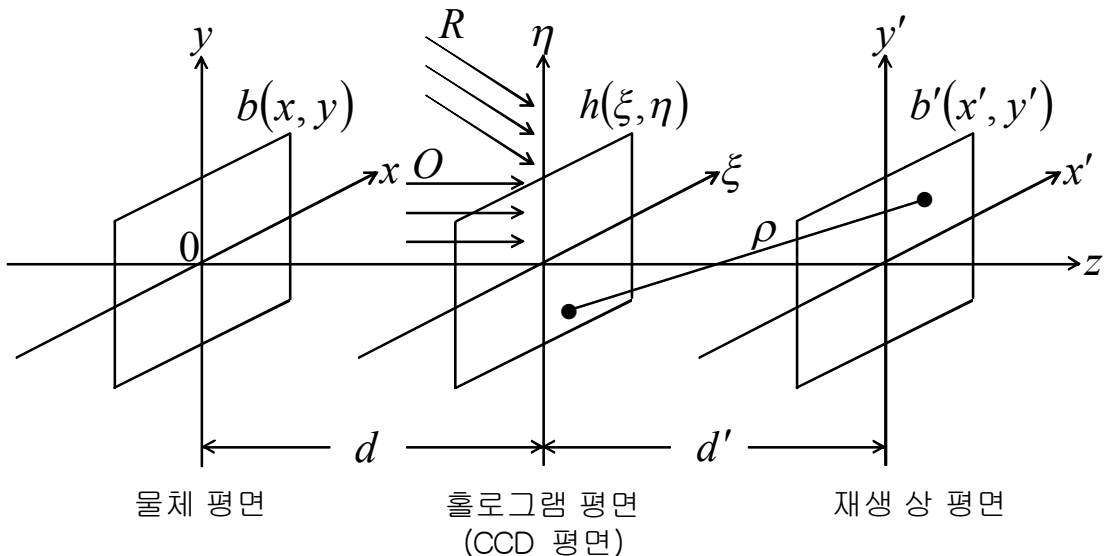


그림 8. 디지털 홀로그램 좌표계

전통적인 홀로그래피에서는 기준파를 조사하여 홀로그램을 재생하지만, 실험적으로 CCD에 기록된 디지털 홀로그램은 수치적으로 표현된 기준파와 산란된 물체파를 홀로그램으로 재생한다. 물체가 놓여진 물체평면에서 산란된 물체파 $O(\xi, \eta)$ 와 기준파 $R(\xi, \eta)$ 가 홀로그램 평면 $h(\xi, \eta)$ 에서 간섭무늬로 기록이 된다. 복소 물체파는 홀로그램 평면에서 아래와 같이 표현한다.

$$O(\xi, \eta) = O_0 \exp \left[\frac{ik}{2d} (\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 \right] \quad (3.1)$$

여기에서 O_0 는 물체파의 진폭이다.

(x_r, y_r, d_r) 점에서 발산된 기준파의 복소 진폭은 구면파의 형태로 아래와 같이 표현된다.

$$R(\xi, \eta) = R_0 \exp \left[\frac{ik}{2d_r} (\xi - x_r)^2 + (\eta - y_r)^2 \right] \quad (3.2)$$

여기에서 R_0 는 기준파의 진폭이다. 이러한 구면파는 (x_r, y_r) 과 (ξ, η) 의 함수이기 때문에 디지털 홀로그램 재생시 (x_r, y_r) 의 위치에 따른 측정오차와 (ξ, η) 의 함수가 수치 처리시 일정하지 않기 때문에 고려되어야 한다. 그러므로 일반적으로 거리에 따라 진폭이 일정한 시준된 평면파를 기준파로 사용한다.

홀로그램 평면에서 간섭무늬의 복소 진폭은 물체파와 기준파의 간섭에 의해 나타나며 아래와 같이 표현된다.

$$U(\xi, \eta) = O(\xi, \eta) + R(\xi, \eta) \quad (3.3)$$

여기서 $O(\xi, \eta)$, $R(\xi, \eta)$ 는 홀로그램 평면에서 물체파와 기준파를 각기 나타낸다.

CCD 센서에 기록된 간섭무늬 강도 분포는 아래와 같이 표현되고 컴퓨터에 디지털 홀로그램으로 저장된다.

$$h(\xi, \eta) = U(\xi, \eta) U^*(\xi, \eta) \quad (3.4)$$

식 3.4에서 간섭무늬를 수학적으로 표현하면 아래 수식과 같다.

$$h(\xi, \eta) = O(\xi, \eta) O^*(\xi, \eta) + R(\xi, \eta) R^*(\xi, \eta) + O^*(\xi, \eta) R(\xi, \eta) + O(\xi, \eta) R^*(\xi, \eta) \quad (3.5)$$

홀로그램을 재생하기 위해서는 기준파 $R(\xi, \eta)$ 를 조사하게 되면 다음과 같게 된다.

$$R(\xi, \eta)h(\xi, \eta) = R(\xi, \eta)[|O(\xi, \eta)|^2 + |R(\xi, \eta)|^2] + O(\xi, \eta)|R(\xi, \eta)|^2 + R^2(\xi, \eta)O^*(\xi, \eta) \quad (3.6)$$

여기서 첫 번째 항은 회절되지 않은 기준파 항이며, 두 번째 항은 허상을, 세 번째 항은 실상을 나타낸다. 그러므로 홀로그램 재생을 위하여 홀로그램에 의해 회절된 전기장 분포를 구할 필요가 있다. 다음 절에서는 이러한 전기장 세기를 어떻게 구하는 가를 설명한다^[4,5,10,11,12].

제 1 절 프레넬 재생방법

본 절에서는 프레넬 재생방법만 소개하고 다음 절에서 프레넬 컨벌루션 재생방법에 대하여 논의 하도록 한다.

레이리-죤머펠드 회절이론을 사용하여 기준파가 홀로그램에 조사될 때^[4,10,11], 홀로그램에 의해 회절된 상 평면에서의 파형은 그림 8에 나타난 디지털 홀로그램의 좌표계를 사용하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$b'(x', y') = \frac{1}{i\lambda} \iint_{-\infty}^{\infty} h(\xi, \eta) r(\xi, \eta) \frac{\exp(ik\rho)}{\rho} \cos\Theta d\xi d\eta \quad (3.1.1)$$

여기서 b' 은 상 평면에서 전기장이고, h 은 CCD 센서에 기록된 홀로그램이다. r 은 기준파이고, ρ 는 홀로그램 평면상의 점에서 재생 평면상의 점 까지의 거리이며, 아래와 같다.

$$\rho = \sqrt{d'^2 + (x' - \xi)^2 + (y' - \eta)^2} \quad (3.1.2)$$

d' 는 재생거리이며 즉, 홀로그램 평면과 상 평면사이의 수직거리이다. 홀로그램 평면의 법선방향과 홀로그램에서 상 점까지 빔의 방향은 매우 작은 각을 이루므로 식 3.1.1에서 $\cos\Theta = 1$ 로 근사된다.

d' 가 x', y', ξ, η 에 비해 매우 크기 때문에 수식 3.1.2를 테일러 전개를 하고 삼차항 이상을 무시하면 식 3.1.3과 같이 표현된다.

$$\rho \approx d' + \frac{(x' - \xi)^2}{2d'} + \frac{(y' - \eta)^2}{2d'} \quad (3.1.3)$$

분모의 ρ 를 재생거리 d' 로 근사화하고 3.1.3식을 3.1.1식에 대입하면 식 3.1.4와 같이 된다.

$$b'(x', y') = \frac{\exp(ikd')}{i\lambda d'} \iint h(\xi, \eta) r(\xi, \eta) \exp\left\{ \frac{ik}{2d'} [(x' - \xi)^2 + (y' - \eta)^2] \right\} d\xi d\eta \quad (3.1.4)$$

위 식 3.1.4에서 지수함수 전개와 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 를 이용하면

$$b'(x', y') = \frac{\exp(\frac{i2\pi d'}{\lambda})}{i\lambda d'} \iint h(\xi, \eta) r(\xi, \eta) \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda d'}(\xi^2 + \eta^2)\right] \cdot \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda d'}(x'^2 + y'^2)\right] \exp\left[-\frac{2i\pi}{\lambda d'}(x'\xi + y'\eta)\right] d\xi d\eta \quad (3.1.5)$$

과 같이 표현된다.

광학계에서 임펄스 반응 함수를 아래와 같이 정의하면,

$$g(\xi, \eta) = \frac{\exp(\frac{i2\pi d'}{\lambda})}{i\lambda d'} \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda d'}(\xi^2 + \eta^2)\right] \quad (3.1.6)$$

따라서 재생된 파는 식 3.1.7과 같이 된다.

$$b'(x', y') = \iint h(\xi, \eta) r(\xi, \eta) g(\xi, \eta) \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda d'}(x'^2 + y'^2)\right] \exp\left[-\frac{2i\pi}{\lambda d'}(x'\xi + y'\eta)\right] d\xi d\eta \quad (3.1.7)$$

아래 주어진 변환식을 사용하여 식 3.1.7을 변환하면

$$f_x = \frac{x'}{\lambda d'}, \quad f_y = \frac{y'}{\lambda d'} \quad (3.1.8)$$

식 3.1.7은 다음과 같이 $h(\xi, \eta) r(\xi, \eta) g(\xi, \eta)$ 의 푸리에 변환으로 표현된다.

$$\begin{aligned} b'(f_x, f_y) &= \iint h(\xi, \eta) r(\xi, \eta) g(\xi, \eta) \exp[i\pi\lambda d'(f_x^2 + f_y^2)] \exp[-2i\pi(f_x\xi + f_y\eta)] d\xi d\eta \quad (3.1.9) \\ &= \exp[i\lambda d'(f_x^2 + f_y^2)] \mathcal{F}[h(\xi, \eta) r(\xi, \eta) g(\xi, \eta)] \end{aligned}$$

함수 $b'(f_x, f_y)$ 을 이용하여 $M \times N$ 화소수를 가진 CCD에 기록된 홀로그램 $h(\xi, \eta)$ 을 그림 9(a)에와 같이 $\Delta\xi$, $\Delta\eta$ 씩 좌표축의 횡축과 종축에 따라 계산한다.

여기서 $\Delta\xi$ 와 $\Delta\eta$ 은 서로 인접한 화소의 수평방향과 수직방향의 간격이므로 함수는 아래와 같이 표현된다.

$$b'(m,n) = \exp[i\pi\lambda d' (m^2 \Delta f_x^2 + n^2 \Delta f_y^2)] \mathcal{F} \left\{ h(a,b) r(a,b) \frac{\exp(ikd')}{i\lambda d'} \exp \left[\frac{i\pi}{\lambda d'} (a^2 \Delta \xi^2 + b^2 \Delta \eta^2) \right] \right\} \quad (3.1.10)$$

그림 9에서 a, b, m, n 은 정수이고 범위는 $-\frac{M}{2} \leq m, a \leq \frac{M}{2}, -\frac{N}{2} \leq n, b \leq \frac{N}{2}$ 이다.

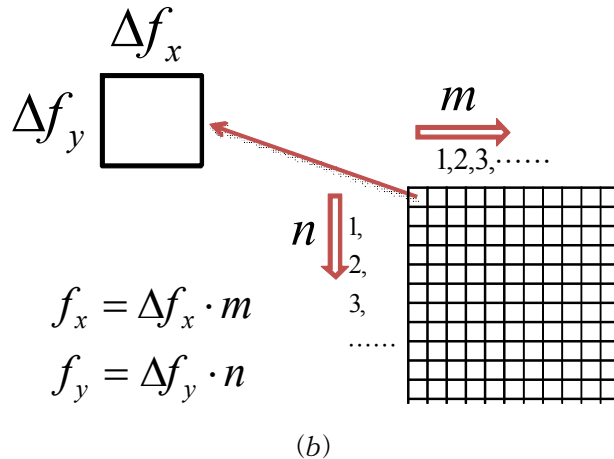
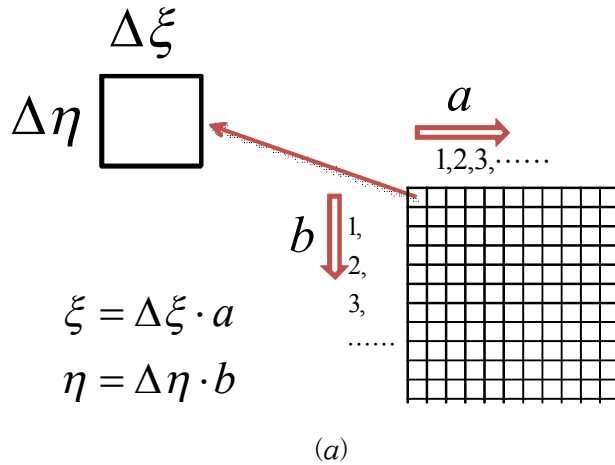


그림 9^[13]. (a)홀로그래프 평면 좌표와 (b)주파수 평면 좌표

홀로그래프 평면에 위치한 CCD 화소($\Delta\xi$ 와 $\Delta\eta$)의 크기와 상 평면($\Delta x'$ 와 $\Delta y'$)의 크기는 서로 다르다. 이산 푸리에 변환 이론으로부터 홀로그래프 공간의 전체 길이 ($M\Delta\xi$)의 역수 주파수 공간의 단위 주파수 공간으로 변환되며 다음과 같다.

$$\Delta f_x = \frac{1}{M\Delta\xi}, \quad \Delta f_y = \frac{1}{N\Delta\eta} \quad (3.1.11)$$

홀로그래프 평면과 상 평면의 관계는 식 3.1.8과 식 3.1.11를 사용하면 다음과 같다.

$$\Delta\xi = \frac{\lambda d'}{M\Delta x'}, \quad \Delta\eta = \frac{\lambda d'}{N\Delta y'} \quad (3.1.12)$$

그러므로 재생된 파는 아래식과 같다.

$$b'(m,n) = \frac{\exp(ikd')}{i\lambda d'} \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda d'}(m^2\Delta x'^2 + n^2\Delta y'^2)\right] \mathfrak{I}\left\{h(a,b)r(a,b)\exp\left[\frac{i\pi}{\lambda d'}(a^2\Delta\xi^2 + b^2\Delta\eta^2)\right]\right\} \quad (3.1.13)$$

위 식 3.1.13은 FFT에 의해 계산될 수 있다.

재생된 상의 화소 해상도 $\Delta x'$ 와 $\Delta y'$ 은 직접적으로 프레넬 변환에서 재생거리 d' 의 변화에 따라 다음과 같이 결정된다.

$$\Delta x' = \frac{d'\lambda}{M\Delta\xi}, \quad \Delta y' = \frac{d'\lambda}{N\Delta\eta} \quad (3.1.14)$$

제 2 절 프레넬 컨벌루션 재생방법

본 절에서는 프레넬 근사로 얻어진 식 3.1.4로부터 컨벌루션 이론을 이용하여 디지털 홀로그램의 재생방법을 논술하였다. 앞 절에서 얻은 식 3.1.4는 다음 식 3.2.1^[14]를 사용하면

$$g(\xi, \eta) = \frac{\exp(ikd')}{i\lambda d'} \exp\left[\frac{ik}{2d'}(\xi^2 + \eta^2)\right] \quad (3.2.1)$$

선형 이동된 함수로 아래 식과 같이 임펄스 반응 함수로 표현이 가능하다.

$$g(x', y', \xi, \eta) = g(x' - \xi, y' - \eta) \quad (3.2.2)$$

그러므로 식 3.2.1은 컨벌루션으로 아래와 같이 표현된다.

$$b'(x', y') = [h(\xi, \eta)r(\xi, \eta)] \otimes g(\xi, \eta) \quad (3.2.3)$$

그러므로 $b'(x', y') = \mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}[h(\xi, \eta)r(\xi, \eta)] \cdot \mathcal{F}[g(\xi, \eta)]\}$ 이 된다^[13].

여기서 $\mathcal{F}[g(\xi, \eta)]$ 은 임펄스 반응 함수의 푸리에 변환이다. 임펄스 반응 함수의 푸리에 변환은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \mathcal{F}[g(\xi, \eta)] &= \iint g(\xi, \eta) \exp[-i2\pi(f_x' \xi + f_y' \eta)] d\xi d\eta \\ &= \exp(ikd') \exp[-i\pi\lambda d'(f_x'^2 + f_y'^2)] \end{aligned} \quad (3.2.4)$$

그러므로 재생된 파는

$$b'(x', y') = \mathcal{F}^{-1}\left\{\mathcal{F}[h(\xi, \eta)r(\xi, \eta)] \exp(ikd') \exp[-i\pi\lambda d'(f_x'^2 + f_y'^2)]\right\} \quad (3.2.5)$$

컨벌루션 방법에서 상과 일정한 화소의 크기가 홀로그램과 상 평면에서 아래와 같은 관계를 가지고 있다.

$$\Delta x' = \Delta \xi, \quad \Delta y' = \Delta \eta \quad (3.2.6)$$

식 3.2.5를 이산 푸리에 변환식으로 변환하면

$$b'(m,n) = FFT^{-1} \{ FFT[h(a,b)r(a,b)] \exp(ikd') \exp[-i\pi\lambda d'(f_a'^2 + f_b'^2)] \} \quad (3.2.7)$$

여기서 $f_a' = \frac{a}{M\Delta x'}$, $f_b' = \frac{b}{N\Delta y'}$, 이고 FFT는 빠른 이산 푸리에 변환이다. 디지털 홀로그램의 재생을 위한 프레넬 컨벌루션 방법은 프레넬 변환 방법 보다 계산 시간이 많이 소요된다.

제 4 장 측정된 디지털 홀로그램 재생 및 자동초점 제어 알고리즘 비교 분석

제 1 절 주파수 영역 필터링 알고리즘

제 2장에서 소개한 것과 같이 본 연구에서는 USAF 1951 시험 표적을 사용하여 생성한 디지털 홀로그램을 CCD에 기록하고 컴퓨터에 그림 파일형식으로 저장하였다. 실험을 통해 얻은 디지털 홀로그램을 재생하기 위하여 본 절에서는 주파수 영역 필터링 알고리즘에 대해 서술한다. 실험에서 CCD에 기록된 홀로그램은 쌍둥이상이 존재하기 때문에 직접적으로 프레넬과 프레넬 컨벌루션 재생방법을 사용하면 잡음이 많아 재생된 이미지에 오차가 발생한다. 그림 10은 홀로그램에서 영상의 실상(+1), 허상(-1), 영차(0)의 생성된 원리를 그림으로 표현하였다^[5,15,16]. 여기에서 R 은 홀로그램 평면에 입사되는 이미지 재생을 위한 기준파이다.

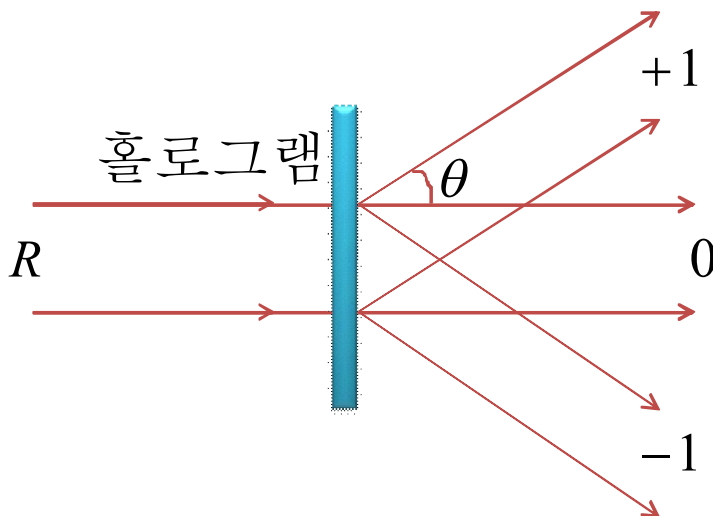


그림 10. 홀로그램에서 생성된 이미지의 실상, 허상, 영차

홀로그램 평면에 생성된 쌍둥이 상을 효과적으로 제거하기 위하여 본 연구에서는 주파수 영역 필터링 알고리즘을 사용하였다. 그림 11은 실험에서 얻은 디지털 홀로그램의 쌍둥이 상 제거를 위한 알고리즘 흐름도이다. CCD로 기록하고 컴퓨터에 저장된 홀로그램 데이터를 푸리에 변환을 통해 주파수 영역에서 실상, 영차, 허상으로 분리시킨 후 실상의 재생을 위한 허상과, 영차를 제거한다. 허상과 영차가 제거된 푸리에 변환된 데이터를 역 푸리에 변환 과정을 통해 실상만 남은 홀로그램 데이터로 생성한다.

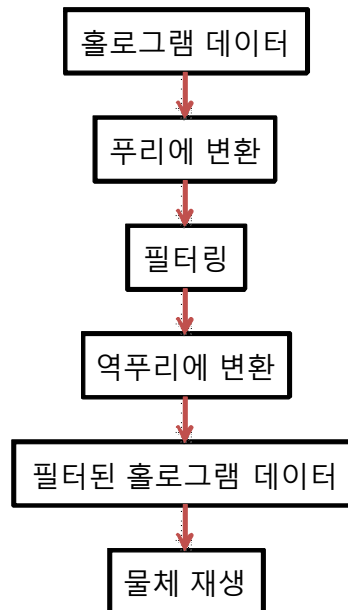


그림 11^[15]. 주파수 영역 필터링 알고리즘 흐름도

본 연구의 실험에서 CCD에 기록된 이미지에서 2장에서 설명한 그림 6의 방법을 이용하여 잡음을 제거한 물체에 대한 홀로그램 이미지는 그림 12와 같다. 그림 12의 홀로그램 이미지를 프레넬 방법으로 직접 재생하면 그림 13과 같은 이미지를 얻게 된다. 그러나 재생된 이미지에 쌍둥이 상이 존재하며 본 연구에서는 실제로 물체의 위상정보가 들어있는 실상만을 얻어야 하기 때문에 허상과 영차를 제거하는 주파수 영역 필터링 과정이 필요시 된다.

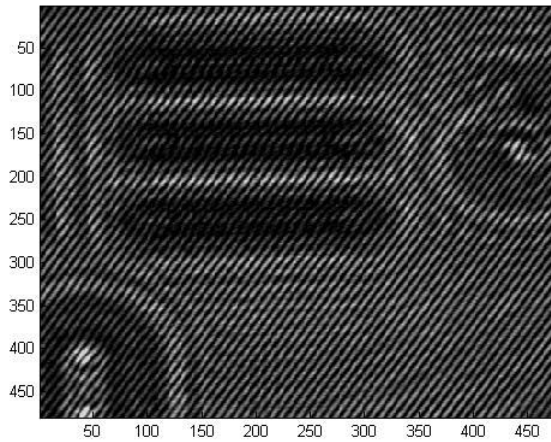


그림 12. 잡음을 제거한 물체의 홀로그램

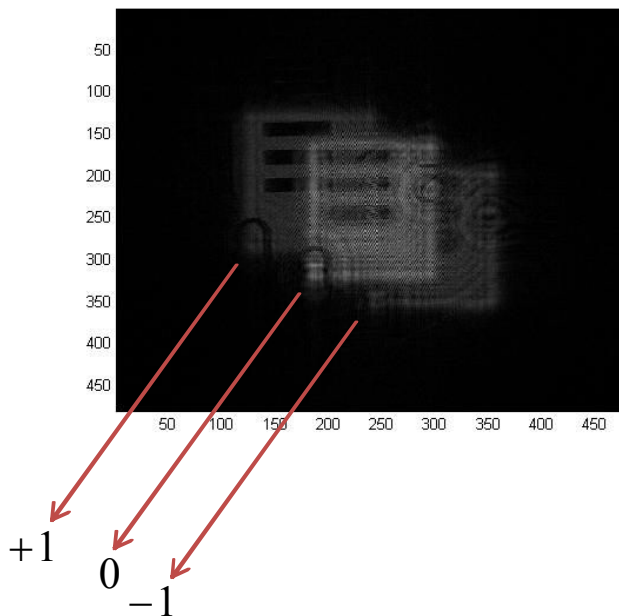


그림 13. 재생된 홀로그램 이미지

물체의 홀로그램에서 허상과 영차를 제거하기 위하여 그림 14와 같이 주파수 영역 필터링 과정을 수행하였다. 그림 14 (a)는 그림 12의 홀로그램 이미지에 대하여 FFT를 한 결과이다. +1 (실상), 0 (영차), -1 (허상)에 대한 회절패턴 정보이다. 물체의 위상정보를 갖고 있는 실상 (+1)외의 회절패턴을 제거하기 위해 그림 14 (b)와 같이 총 화소개수가 480×480 의 수치 행렬 중심에 행렬 값이 0인 60개의 화소개수를 지름으로 한 원형의 이미지 데이터를 생성한다. 그림 14 (c)와 같이 480×480 의 수치 행렬에서 왼쪽 상단의 240×240 의 화소개수에만 행렬 값이 1인 이미지 데이터를 생성한다. 이렇게 생성된 두 개의 이미지 데이터와 물체의 회절패턴 정보를 MATLAB을 이용하여 곱셈 연산을 수행한 결과 그림 14 (d)에서처럼 물체의 위상정보를 가지는 실상의 회절패턴만을 구현할 수 있다.

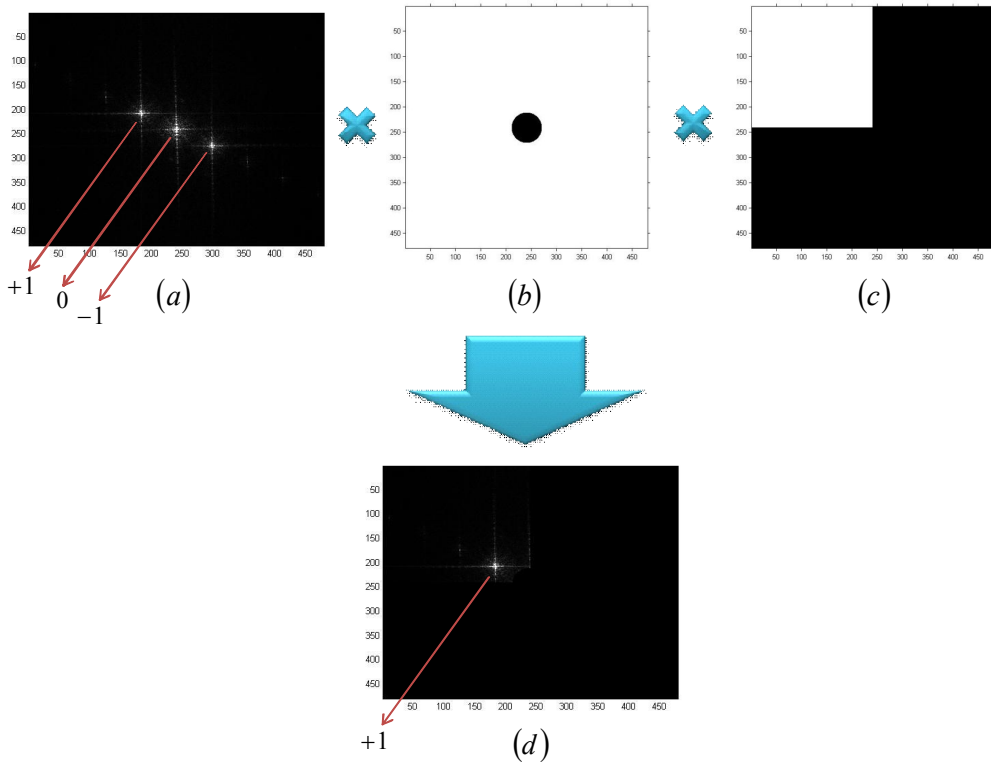


그림 14. 주파수 영역 필터링 과정

위의 주파수 영역 필터링 과정을 수행한 후 얻어진 그림 14 (d)의 회절패턴에 대하여 역 FFT를 하여 프레넬 방법을 적용하여 홀로그램을 재생하면 그림 15와 같은 물체의 진폭정보를 가지는 이미지를 얻을 수 있다. 삼차원 형상 측정을 위한 절대 위상 측정은 위상 이동방식에 의해 앞으로 수행되어야 할 과제이다.

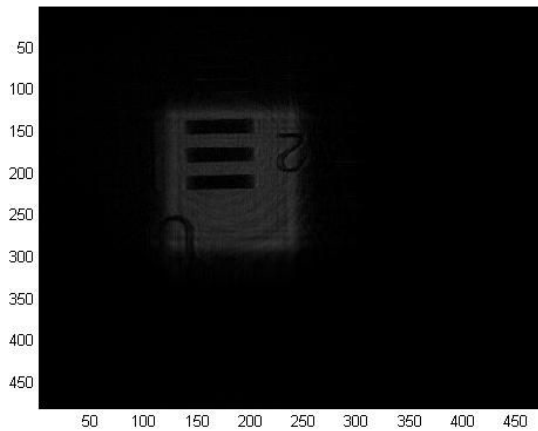


그림 15. 주파수 영역 필터링을 수행한 물체의 재생 상

제 2 절 프레넬 방법을 이용한 디지털 홀로그래ムの 재생

본 절에서는 프레넬 방법을 이용하여 CCD에 기록된 물체의 디지털 홀로그래ム 재생과정을 논술하였다. 프레넬 방법을 이용한 디지털 홀로그래ムの 재생을 위하여 그림 16과 같이 그룹 0, 원소 2의 부분을 측정하였다.

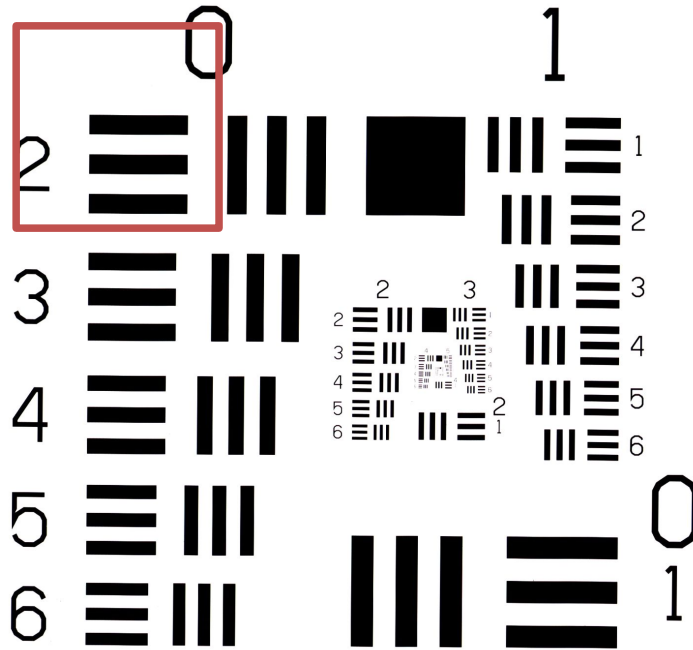


그림 16. USAF 1951 시험 표적의 그룹 0, 원소 2의 위치

그림 17의 그룹 0, 원소 2를 CCD에서 기록한 홀로그래ム을 2장 2절에서 언급한 방법을 사용하여 잡음이 제거된 홀로그래ム 이미지이다.

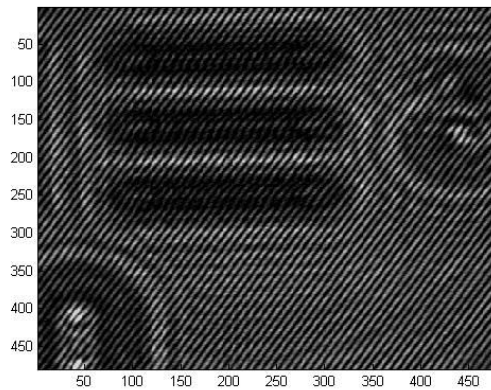


그림 17. 재생을 위한 잡음이 제거된 물체 홀로그램

아래의 그림 18 프레넬 재생방법 알고리즘을 사용하여 프레넬 재생방법을 수행하였다.

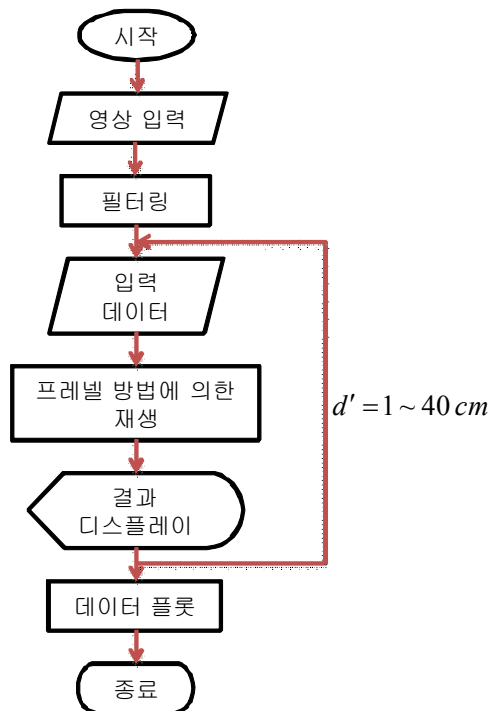


그림 18. 프레넬 재생방법 알고리즘 흐름도

위 그림 18의 프레넬 재생방법 알고리즘 흐름도 에서 영상 입력은 CCD에서 측정 한 물체에 대한 홀로그램에 대해 기준파와 잡음을 제거한 물체 홀로그램이며, 이렇게 측정한 홀로그램 영상 파일을 주파수 영역 필터링 과정을 통해 허상과 영차의 상을 제거한 물체의 진폭정보를 가진 실상에 대한 홀로그램만을 얻는다. 그 후 물체 홀로그램에 프레넬 재생방법을 위한 상 평면의 데이터 값인 $\Delta x', \Delta y'$ 을 다음의 수식과 같이 대입하여 주며, $\Delta x' = \frac{d' \lambda}{M \Delta \xi}$, $\Delta y' = \frac{d' \lambda}{N \Delta \eta}$ 이 식의 변수들은 아래와 같이 지정하여 주었다.

d' : 재생거리 변화값
 λ : $632.8nm$
 m : 상 평면에서의 화소갯수
 n : 홀로그램 평면에서의 화소갯수
 $\Delta \xi$: $8.4\mu m$ (CCD의 수평방향의 화소크기)
 $\Delta \eta$: $9.8\mu m$ (CCD의 수직방향의 화소크기)

상 평면에서의 화소개수 m, n 과 홀로그램 평면에서의 화소개수 a, b 를 입력하여 준다. 여기서 상 평면의 화소개수 m, n 과 홀로그램 화소개수 a, b 는 같으며, 480×480 이다.

입력 데이터를 입력한 후, 앞서 3장에서 언급했었던 수식 (3.19)인 프레넬 재생 공식에 대입한다. 재생거리 d' 값 (재생 범위는 $1 \sim 40cm$ 이며, 간격변화는 $1cm$ 이다.)을 변화시켜 재생거리의 변화에 따른 대비비가 달라진 물체 홀로그램 상을 얻는다. 재생거리에 따른 대비비가 변화된 상들을 이용하여 재생거리에 따른 대비 변화 그래프를 그려 대비 값이 가장 클 때의 재생거리를 찾는다.

위의 프레넬 재생방법 알고리즘을 이용하여 재생거리 변화에 따른 상의 대비변화는 그림 19와 같다.

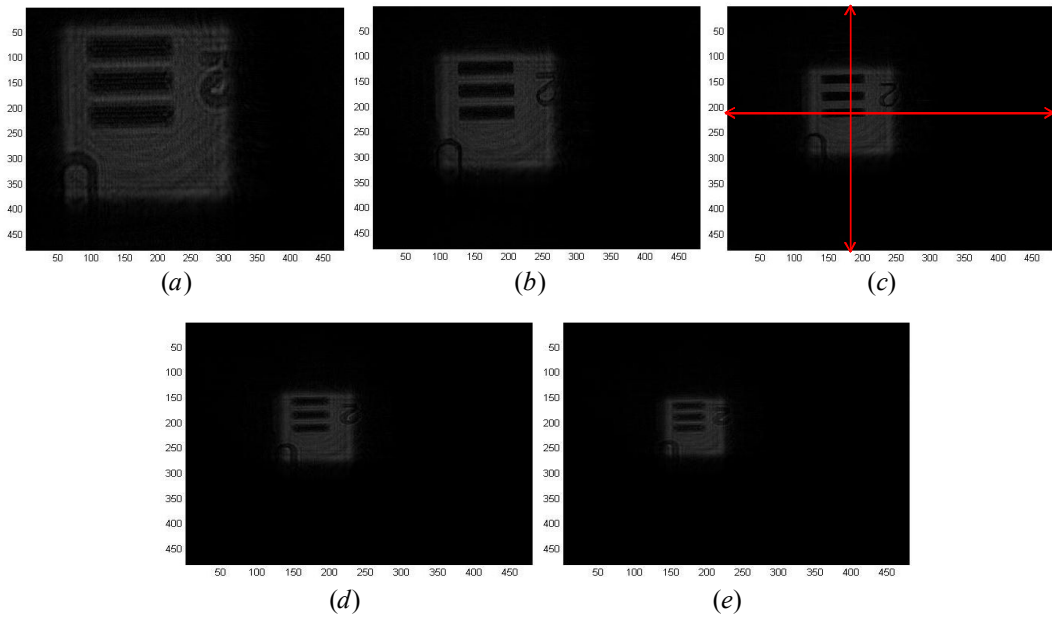


그림 19. 프레넬 방법을 이용한 재생거리에 따른 물체 상의 대비변화

그림 19에서 a, b, c, d, e는 각각의 재생거리가 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm, 30 cm 인 경우에 따른 물체 홀로그램의 재생 상이다. 이 재생거리에 따른 상들에서 가장 대비비가 뛰어난 상을 육안으로 확인이 가능하듯이 그림 19 (c)의 상이 다른 상에 비해 선명함을 확인할 수 있다.

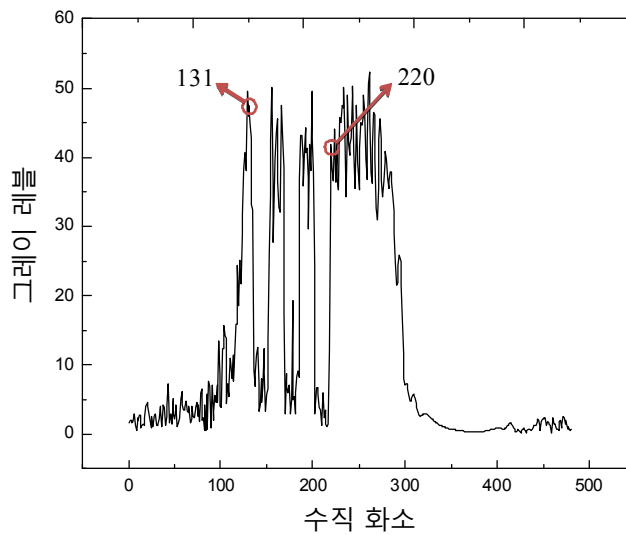


그림 20. 프레넬 방법으로 재생된 상의 수직방향 화소범위에 따른 대비 값 변화

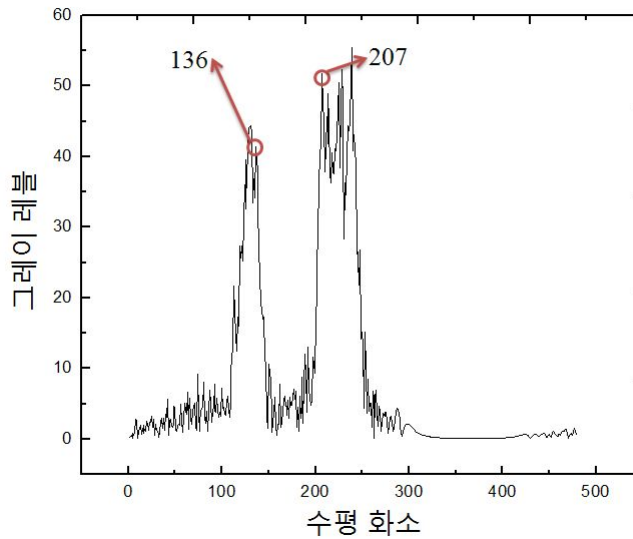


그림 21. 프레넬 방법으로 재생된 상의 수평방향 화소범위에 따른 대비 값 변화

프레넬 방법으로 재생된 홀로그램 상의 선폭을 정량적으로 확인하기 위하여 그림 19 전체 상의 각각의 수직방향과 수평방향 대하여 화소개수를 계산하고 선폭을 구하여 표 2의 USAF 1951 해상도 시험 표적 데이터와 비교분석한다. 화소개수를 구하기 위하여 각각의 상에 대해 화소범위에 따른 대비 값 변화 그래프를 그린다. 수직방향의 화소개수를 구하기 위하여 그림 20과 같은 방법으로 재생된 USAF 1951 시험 표적의 검은 수평 막대기 경계에서 첫 번째 최대 대비 값과 네 번째 대비 값의 화소범위를 찾고 그 사이의 개수를 구한다. 수평방향의 화소개수를 구하기 위하여 그림 21에서와 같이 막대기 경계에서 급격히 하강하는 대비 값과 급격히 상승하는 대비 값의 화소범위를 찾고 그 사이의 개수를 구한다.

위의 방법을 이용하여 그림 19의 각각 상의 수직방향과 수평방향에 대한 화소개수와 재생거리의 변화에 따른 상 평면의 화소크기를 구한다. 화소개수와 화소크기를 곱셈하여 그룹 0, 원소 2의 수직과 수평의 전체 크기를 구하고 수직 방향에서는 검은 수평 막대기 하나의 선폭을 구한다.

표 3. 프레넬 방법을 이용한 수직방향의 재생거리에 따른 상 크기

	화소 크기	화소 수	상 크기	선폭
(a) $d' = 10\text{ cm}$	15.7 μm	137	2150.9 μm	430.2 μm
(b) $d' = 15\text{ cm}$	23.5 μm	85	1997.5 μm	399.5 μm
(c) $d' = 20\text{ cm}$	31.4 μm	71	2229.4 μm	445.9 μm
(d) $d' = 25\text{ cm}$	39.2 μm	58	2273.6 μm	454.7 μm
(e) $d' = 30\text{ cm}$	47.1 μm	51	2402.1 μm	480.4 μm

표 4. 프레넬 방법을 이용한 수평방향의 재생거리에 따른 상 크기

	화소 크기	화소 수	상 크기
(a) $d' = 10\text{ cm}$	13.5 μm	194	2619 μm
(b) $d' = 15\text{ cm}$	20.2 μm	123	2484.6 μm
(c) $d' = 20\text{ cm}$	26.9 μm	89	2394.1 μm
(d) $d' = 25\text{ cm}$	33.6 μm	74	2486.4 μm
(e) $d' = 30\text{ cm}$	40.4 μm	65	2626 μm

표 3과 표 4는 수직과 수평방향에서 재생거리에 따른 각각의 상 크기를 구한 것이다. 표로부터 알 수 있듯이 수직방향과 수평방향에서 재생거리가 20 cm인 그림 19 (c) 상의 선폭이 알려진 USAF 1951 시험 표적의 데이터의 그룹 0, 원소 2의 선폭 크기인 $445\ \mu\text{m}$ 와 매우 근사한 값을 가짐을 알 수 있다. 실제 실험에서 측정된 물체 평면과 홀로그램 평면 사이의 거리도 20 cm 였으며, 물체평면으로부터 홀로그램 평면, 홀로그램 평면으로부터 상 평면의 재생거리가 일치할 때, 대비 값이 크고 선명한 물체 상을 얻을 수 있다. 위 결과에서 알 수 있듯이 프레넬 방법을 사용한 재생방법의 정확성도 확인할 수 있었다.

제 3 절 프레넬 컨벌루션 방법을 이용한 디지털 홀로그램의 재생

본 절에서는 프레넬 컨벌루션 방법을 이용하여 CCD에 기록된 물체의 디지털 홀로그램 재생과정을 논술하였다. 프레넬 컨벌루션 방법으로 디지털 홀로그램의 재생을 위하여 2절에서와 같이 USAF 1951 시험 표적의 그룹 0, 원소 2의 부분을 측정하였다.

아래의 그림 22의 프레넬 컨벌루션 재생방법 알고리즘을 사용하여 물체 상에 대한 재생을 수행 하였다.

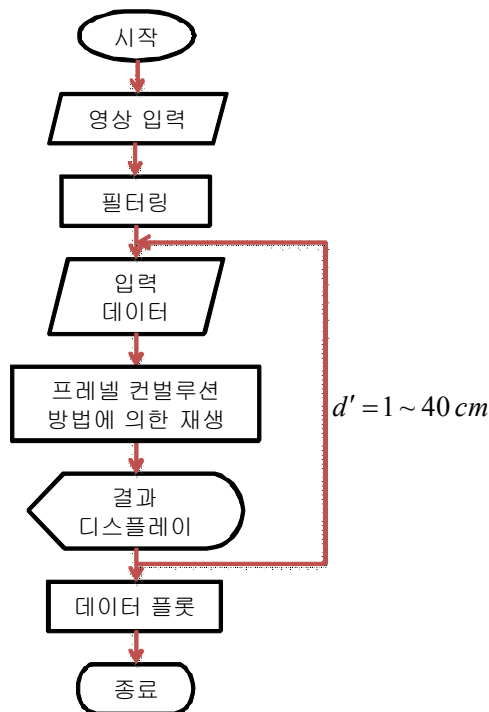


그림 22. 프레넬 컨벌루션 재생방법 알고리즘 흐름도

프레넬 컨벌루션 재생방법 알고리즘 흐름도에서 영상 입력은 위 2절의 프레넬 재생방법에서 사용하였던 이미지 파일을 동일하게 사용 하였으며, 프레넬 재생에서와

같은 동일한 방법을 사용하여 주파수 영역 필터링 과정을 거친 물체의 진폭과 위상정보를 가진 실상에 대한 홀로그램만을 얻는다. 그 후 물체 홀로그램에 프레넬 컨벌루션 재생방법을 위한 상 평면의 데이터 값인 $\Delta x', \Delta y'$ 을 다음의 수식과 같이 대입하여 주며, $\Delta x' = \Delta \xi$, $\Delta y' = \Delta \eta$ 이 식의 변수들은 아래와 같이 지정하여 주었다.

$$\begin{aligned} d' &: \text{재생거리 변화값} \\ \lambda &: 632.8nm \\ k &: \frac{2\pi}{\lambda} (\text{파수}) \\ f_x &: x\text{축 방향의 공간 주파수} \\ f_y &: y\text{축 방향의 공간 주파수} \\ \Delta \xi &: 8.4\mu m \text{ (CCD의 수평방향의 화소크기)} \\ \Delta \eta &: 9.8\mu m \text{ (CCD의 수직방향의 화소크기)} \end{aligned}$$

입력 데이터를 입력한 후, 3장에서 언급된 식 (3.2.7)인 프레넬 컨벌루션 재생공식에 대입한다. 재생거리 d' 값 (재생 범위는 $1 \sim 40cm$ 이며, 간격변화는 $1cm$ 이다.)을 변화시켜 재생거리의 변화에 따른 대비비가 달라진 물체 홀로그램 상을 얻는다. 재생거리에 따른 대비비가 변화된 상들을 이용하여 재생거리에 따른 대비 변화 그래프를 그려 대비 값이 가장 클 때의 재생거리를 찾는다.

위의 프레넬 컨벌루션 재생방법 알고리즘을 이용하여 재생거리 변화에 따른 상들의 대비변화는 그림 23과 같다.

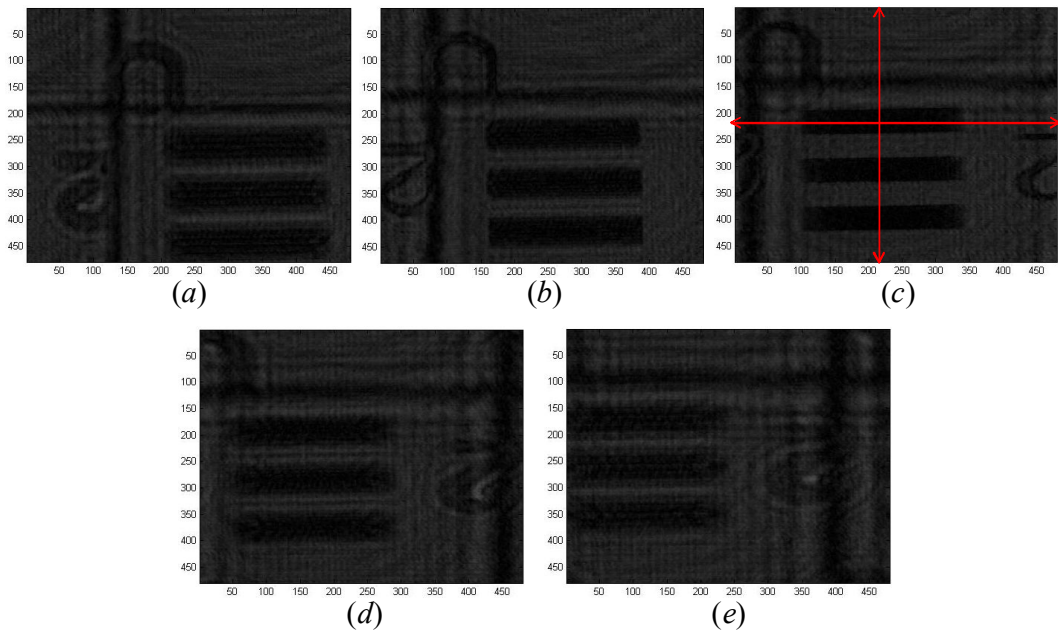


그림 23. 프레넬 컨벌루션 방법을 이용한 재생거리에 따른 물체 상의 대비변화

그림 23에서 a, b, c, d, e는 각각의 재생거리가 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm, 30 cm 인 경우에 따른 물체 홀로그램의 재생된 상이다. 이 재생거리에 따른 상들에서 가장 대비비가 뛰어난 상을 육안으로 확인이 가능하듯이 그림 23 (c)의 상이 다른 상에 비해 선명함을 확인할 수 있다.

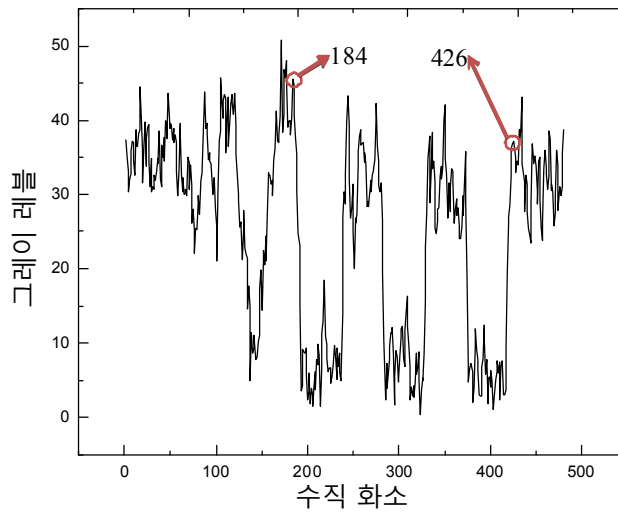


그림 24. 프레넬 컨벌루션 방법으로 재생된 상의 수직방향 화소범위에 따른 대비값 변화

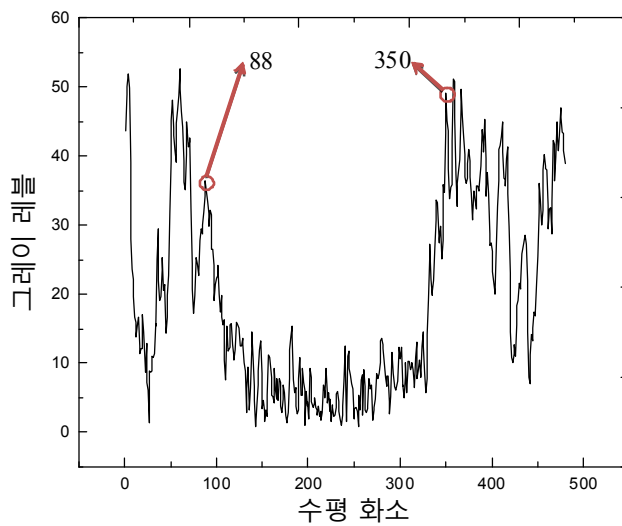


그림 25. 프레넬 컨벌루션 방법으로 재생된 상의 수평방향 화소범위에 따른 대비값 변화

프레넬 컨벌루션 방법으로 재생된 홀로그램 상의 선폭을 정량적으로 확인하기 위하여 2절에서 소개된 방법으로 상의 각각의 수직방향과 수평방향 대하여 화소 개수를 계산하고 선폭을 구하여 표 2의 USAF 1951 해상도 시험 표적 데이터와 비교분석한다. 그림 24와 그림 25는 프레넬 컨벌루션 재생방법을 이용하여 재생거리가 20 cm인 그림 23 (c) 상의 수직방향과 수평방향의 화소범위에 따른 대비 값 변화를 표현한 그래프이다.

위 2절과 동일한 방법으로 그림 23의 각각 상의 수직방향과 수평방향에 대한 화소개수와 재생거리의 변화에 따른 상 평면의 화소크기를 구하고, 그룹 0, 원소 2의 수직과 수평의 전체 상 크기와 수직 방향에서는 검은 수평 막대기 하나의 선폭을 구한다.

표 5. 프레넬 컨벌루션 방법을 이용한 수직방향에서 재생거리에 따른 상의 크기

	화소 크기	화소 수	상 크기	선폭
(a) $d' = 10\text{ cm}$	9.8 μm	270	2646 μm	529.2 μm
(b) $d' = 15\text{ cm}$	9.8 μm	257	2518.6 μm	503.7 μm
(c) $d' = 20\text{ cm}$	9.8 μm	242	2371.6 μm	474.3 μm
(d) $d' = 25\text{ cm}$	9.8 μm	263	2577.4 μm	515.5 μm
(e) $d' = 30\text{ cm}$	9.8 μm	268	2626.4 μm	525.3 μm

표 6. 프레넬 컨벌루션 방법을 이용한 수평방향에서 재생거리에 따른 상의 크기

	화소 크기	화소 수	선폭
(a) $d' = 10\text{ cm}$	8.4 μm	257	2158.8 μm
(b) $d' = 15\text{ cm}$	8.4 μm	238	1999.2 μm
(c) $d' = 20\text{ cm}$	8.4 μm	262	2200.8 μm
(d) $d' = 25\text{ cm}$	8.4 μm	277	2326.8 μm
(e) $d' = 30\text{ cm}$	8.4 μm	270	2268 μm

표 5와 표 6은 프레넬 컨벌루션 방법으로 재생된 상들의 수직과 수평방향에서 재생거리에 따른 각각의 상 크기를 구한 것이다. 표로부터 알 수 있듯이 수직방향과 수평방향에서 재생거리가 20 cm인 그림 23 (c) 상의 선폭이 알려진 USAF 1951 시험 표적의 데이터의 그룹 0, 원소 2의 선폭 크기인 445 μm 와 매우 근사한 값을

가짐을 알 수 있다. 실제 실험에서 측정된 물체 평면과 홀로그램 평면 사이의 거리도 20 cm 였으며, 물체평면으로부터 홀로그램 평면, 홀로그램 평면으로부터 상 평면의 재생거리와 일치하였다. 이로부터 본 논문에서 사용된 프레넬 컨벌루션 재생 방법의 정확성을 확인할 수 있다.

제 4 절 자동초점 제어 알고리즘 비교 분석

본 절에서는 CCD에 기록된 물체의 홀로그램을 프레넬과 프레넬 컨벌루션 재생 방법을 적용하여 물체 상의 재생을 위한 자동초점 제어 알고리즘에 대하여 기술한다.

디지털 홀로그래피에서 자동초점 제어는 현미경 등에서 상의 초점을 맞추기 위하여 역학적으로 초점거리를 조절하는 방법과는 달리, 일반적으로 디지털 카메라에서 수치적으로 물체 상의 재생거리를 변화하면서 재생된 물체 상의 대비가 최적이 되는 위치를 자동적으로 찾아내는 방법이다. 이것의 목적은 재생된 상의 대비를 수치적으로 계산하여 재생 상을 최적화시키는데 있다. 이러한 대비를 최적화하기 위해 상의 푸리에 변환을 통해 얻은 각 화소의 위상과 진폭에서 중 진폭을 이용한다. 푸리에 계수 크기의 동력학적 범위는 매우 크기 때문에, 영상의 가시화의 대비를 증대하기 위한 방법으로 로그 사상(logarithmic mapping)이 적용된다^[17].

이러한 방법을 사용하여 재생된 물체의 진폭 분포에 따른 재생상의 대비를 결정하는 푸리에 스펙트럼 알고리즘 공식은 아래와 같다.

$$f(z) = \sum_{\xi, \eta} \log [1 + O_{FFT}(\xi, \eta, z)] \quad (4.4.1)$$

식 4.4.1에서 $f(z)$ 는 계산된 초점 값이고, z 는 물체 상의 재생거리이다. 식 4.4.1은 아래와 같이 표현된다.

$$O_{FFT}(\xi, \eta, z) = |FFT_{2D}[|O(x, y, z)|]| \quad (4.4.2)$$

$O(x, y, z)$ 은 재생거리가 z 인 지점에서의 재생된 물체 상의 진폭정보이다.

본 논문에 적용된 두 번째 자동초점 제어 알고리즘은 임계 절대 그래디언트 (Threshold absolute gradient)로 아래 기술한 한계조건 이상에서의 진폭 값을 가산하는 방식이며, 아래와 같은 식으로 표현한다^[18].

$$F = \sum_{i=1}^{480} \sum_{j=1}^{480} |I(i+1, j) - I(i, j)| \quad (4.4.3)$$

식 4.4.3에서 화소(i, j)의 그레이 레벨 강도는 $I(i, j)$ 이며, 한계조건은 $|I(i+1, j) - I(i, j)| \geq \nu$ 이다.

윗 장에서 언급했듯이 실험에 사용된 물체는 USAF 1951 시험 표적의 그룹 0, 원소 2이다. 실제 실험으로 얻어진 디지털 홀로그램 상을 프레넬 방법을 이용하여 재생거리를 1cm부터 40cm까지 1cm간격으로 물체의 상을 재생하였다. 그림 26과 그림 27은 각각 프레넬과 프레넬 컨벌루션 재생방법에서 푸리에 스펙트럼 방식으로 자동초점 제어 알고리즘을 사용하여 재생 거리에 따른 초점 값의 변화를 나타낸 그래프이다.

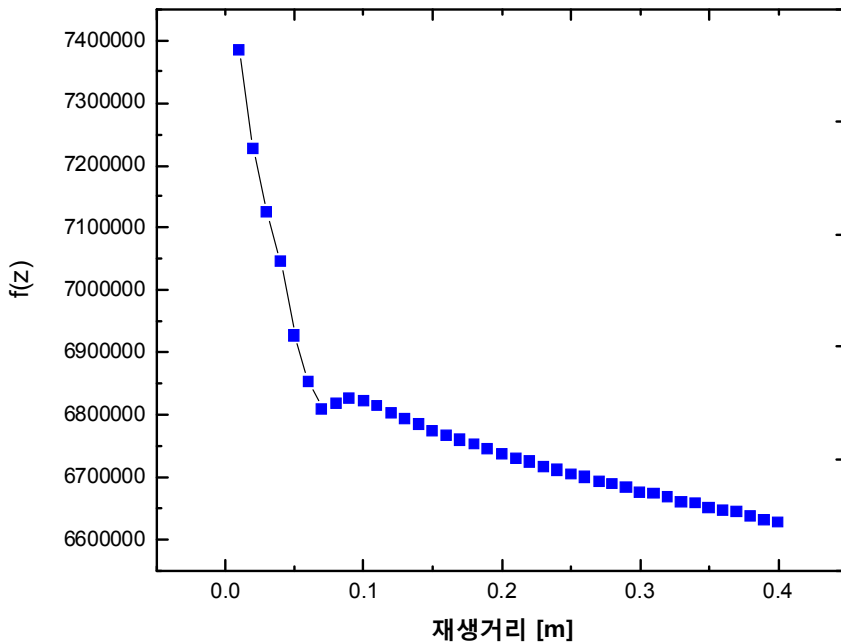


그림 26. 프레넬 방법에서 푸리에 스펙트럼 자동초점 알고리즘이 적용된
재생 거리에 따른 초점 값

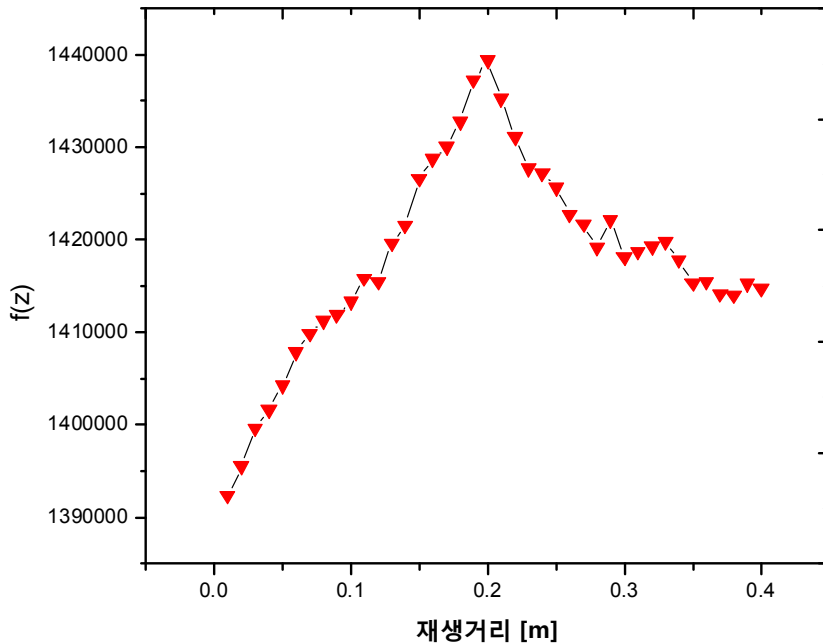


그림 27. 프레넬 컨벌루션 방법에서 푸리에 스펙트럼 자동초점 알고리즘이 적용된 재생거리에 따른 초점 값

또한, 위의 프레넬과 프레넬 컨벌루션 재생방법에서 사용하였던 동일한 표적에 대하여 홀로그램을 기록하였다. CCD에 기록된 디지털 홀로그램 상을 위와 같은 방법으로 재생거리를 1cm부터 40cm까지 1cm 간격으로 상을 재생하였으며 임계 절대 그래디언트 자동초점 제어 알고리즘을 사용하였으며, 재생거리에 따른 초점 값의 변화가 그림 28과 그림 29의 그래프와 같다.

위 실험에서 물체 재생을 위해 1cm 간격으로 측정하였으며, 허용오차 범위는 $\pm 0.5\text{ cm}$ 이며, 그림 27에서 얻은 재생거리의 변화에 대한 $f(z)$ 의 변화로부터 $f(z)$ 가 최대가 되는 위치는 20cm이며 이것은 재생을 위해 사용된 물체(USAF 1951)에서 CCD 평면(홀로그램 평면)까지의 거리가 20.6cm이므로 오차 범위 내에서 자동초점 알고리즘으로부터 얻은 거리가 일치함을 알수있다. 그러나 재생거리를 달리하여 자동초점 알고리즘을 적용한 결과 이러한 오차는 작아짐을 알수있었다. 그러므로 특정재생거리에서 홀로그램 시스템을 교정하면 정확하게 재생거리를 자동초점

알고리즘을 통해 얻을 수 있을것으로 생각된다.

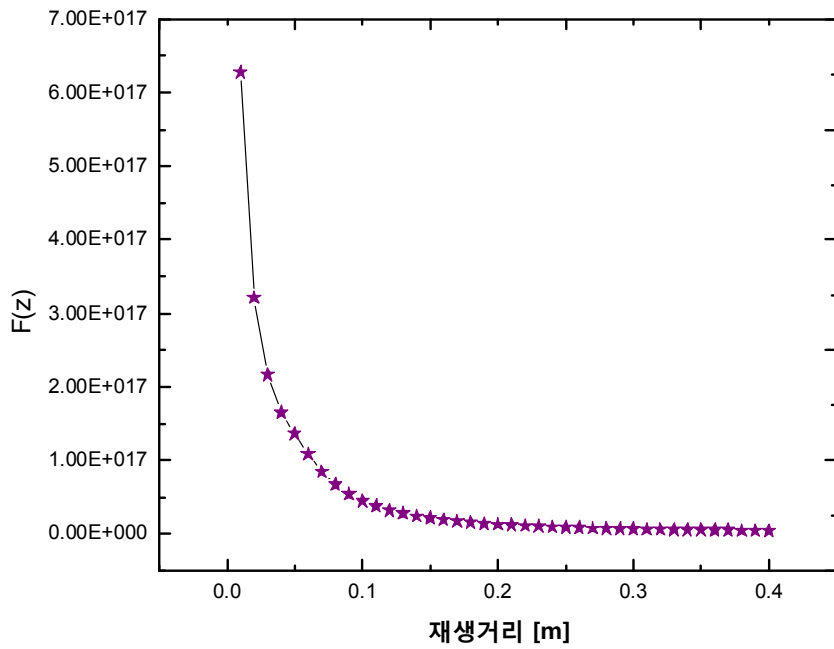


그림 28. 프레넬 방법에서 임계 절대 그래디언트 자동초점 알고리즘이 적용된
재생거리에 따른 초점 값

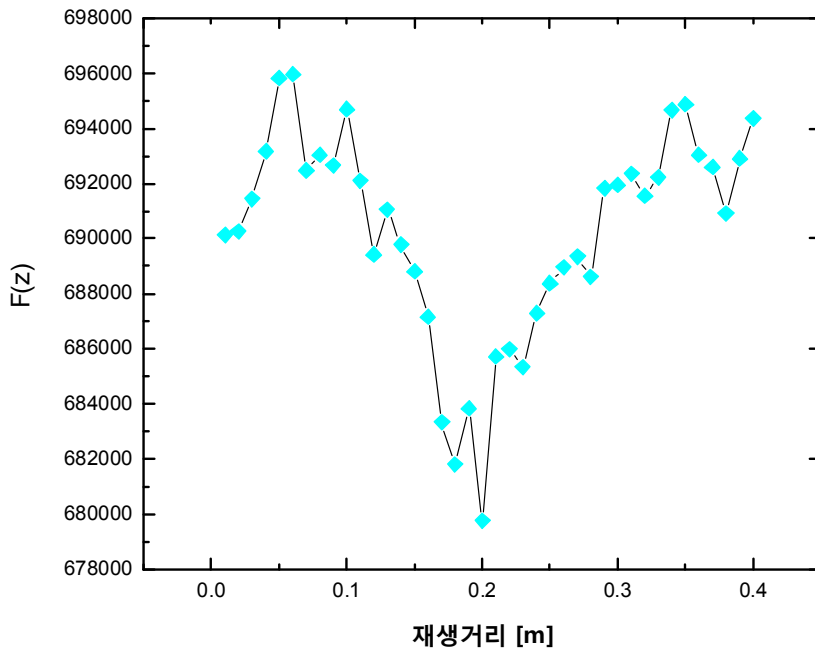


그림 29. 프레넬 컨벌루션 방법에서 임계 절대 그래디언트 자동초점 알고리즘이 적용된 재생거리에 따른 초점 값

재생거리 변화에 따른 상의 정확도와 재생된 물체 상의 크기 결과로부터 알 수 있듯이 재생거리에 따른 상의 대비 및 선명도에 현저한 차이점이 존재한다. 자동초점 제어 알고리즘을 사용하여 측정된 물체의 홀로그램에서 물체 평면과 CCD와의 기록거리를 측정하지 않아도 재생상이 가장 좋은 대비 및 선명도를 가질 수 있는 재생거리를 확인 할 수 있다. 위에서 기술된 푸리에 스펙트럼, 임계 절대 그래디언트 방식을 적용한 자동초점 결정 방식은 프레넬 방법을 사용한 재생에서는 초점위치를 결정할 수 없는데 이것은 재생거리 마다 상의 크기가 달라지기 때문에 적용이 불가능하다. 이러한 단점을 극복하기 위해 파조각(wavelet) 방법을 적용하고 상의 크기를 재생거리에 따라 동일하게 하는 방법들이 연구되고 있다. 그러나 프레넬 컨벌루션 재생은 푸리에 스펙트럼 및 임계 절대 그래디언트 방식을 적용시 초점위치가 실험값과 잘 일치함을 알 수 있다.

위의 그림 28의 프레넬 방법을 사용한 자동초점을 이용한 재생거리에 대한 자동초점 알고리즘은 적용이 되지 않지만, 그림 29의 프레넬 컨벌루션 방법을 사용한 재생거리에 따른 자동초점 알고리즘은 적용할 수 있다.

그림 29에서 재생거리에 대해 푸리에 스펙트럼 방법과는 달리 $F(z)$ 의 값이 작을수록 상의 대비 및 선명도가 뛰어나며, 위 그림에서는 재생거리가 20cm 일때, $F(z)$ 의 값이 가장 작음을 알 수 있다.

이 재생거리는 그림 27 결과에 대한 설명에서와 같이 오차범위 내에서 재생거리가 잘 일치함을 알 수 있으며, 이미 설명된 방법과 같은 방법을 적용하면, 자동초점 알고리즘을 통해 얻은 재생 거리 오차를 줄일 수 있을 것으로 생각된다.

제 5 장 결론 및 향후 계획

본 논문에서는 마하젠더 형태의 간섭계를 이용하여 UASA 1951 시험 표적의 그룹 0, 원소 2에 대한 홀로그래를 CCD에 기록 하였고, 기준파에 의해 생성된 잡음을 제거하기 위하여 빔 분할기에 의해 두 경로를 가지는 빔에 대해 물체로 향하는 빔을 차단하여 기준파에 의해 야기되는 잡음 정보를 제거하였다. 이 물체 홀로그래 이미지는 실상, 허상과 영차의 정보중에서 실상의 정보만을 얻기 위하여 주파수 영역 필터링 과정을 통해 허상과 영차의 홀로그래 이미지를 제거해 준다. 물체의 진폭과 위상정보만이 담긴 실상의 홀로그래를 이용하여 프레넬 방법과 프레넬 컨벌루션 재생 방법을 사용하여 재생거리의 변화에 따른 각각의 이미지를 얻었다. 재생거리 변화에 따른 이미지들을 이용하여 수직방향과 수평방향의 화소개수를 구하여 실험 물체인 USAF 1951 시험 표적의 알려진 데이터와 비교하였다. 확인 결과, 재생거리가 20 cm 일 때 재생된 홀로그래의 대비비가 선명함을 볼 수 있었으며, 실제로 물체 평면부터 홀로그래가 기록되는 CCD 평면과의 거리와 일치함을 알 수 있었고, 재생거리 20 cm에서의 검은 수평 막대기 하나의 선폭과 전체 크기가 알려진 데이터 값과 마이크로미터 정밀도내에서 근사함을 확인 할 수 있었다.

푸리에 스펙트럼 및 임계 절대 그레디언트 자동 초점 제어 알고리즘을 프레넬과 프레넬 컨벌루션 방법에 적용하여 재생거리에 따른 초점 값의 변화를 계산해보았으며, 실험치와 잘 일치함을 알 수 있었다.

향후 연구 계획은 본 연구에서 설계하였던 실험을 바탕으로 물체인 USAF 1951 시험 표적을 대물렌즈(MO)를 사용하여, 확대된 물체에 대하여 본 연구에서 사용하였던 프레넬과 프레넬 컨벌루션 재생방법을 이용하여 물체 홀로그래 재생 이미지의 거리를 비교하고자 한다. 더 나아가 위상이동 방식을 적용하여 절대위상을 측정하여 의료용으로 사용가능한 홀로그래피 현미경 개발을 통하여 셀 등의 삼차원 측정에 적용할 예정이다.

감사의 글

2년 전, 한국에 왔을 때 저는 한명의 외국인 유학생으로서 언어와 생활에 많은 부족함이 있음에도 불구하고, 김진태 교수님과 실험실 선배님, 학우들의 도움으로 순조롭게 학업을 끝 마칠 수 있게 되었습니다. 더욱이 지도교수님인 김진태 교수님께서 언어로 인해 학업으로 교류가 어려움에도 차근차근 지도하여 주었고 생활하는 부분에 대해서도 많은 도움을 주었습니다. 또 저희 광기술공학과 최호 선배는 언어와 학업으로 힘들어하는 저에게 매우 많은 도움을 주었습니다. 그분들의 이러한 도움과 지도가 없었다면, 저의 논문도 완성될 수 없었을 것이라 생각합니다.

그리고 바쁜 시간에도 불구하고 저의 논문을 심사해주시고 부족했던 점에 대해 자세한 설명과 더불어 알려주셨던 저희 학과 교수님들인 김현수 교수님, 박시현 교수님, 안태정 교수님, 박종락 교수님 모든 교수님들께 감사드리고, 마지막으로 저에게 큰 힘이 되어 주셨던 실험실 선배 김도형, 실험실의 유진창, 최훈국, 그리고 광기술 공학과 많은 학우들께 진심으로 감사드립니다.

무엇보다 먼 유학 생활 중에 옆에서 힘이 되어준 여자 친구 김순복과 고향에서 항상 저를 항상 생각해 주신 부모님께 감사드립니다.

이 밖에 제가 미처 언급하지 못한 저를 응원해 주신 분들에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] <http://www.holography.ru/histeng.htm>
- [2] <http://baike.baidu.com/view/512597.htm>
- [3] <http://baike.baidu.com/view/988306.htm>
- [4] C. J. Mann, "Quantitative Biological Microscopy by Digital Holography," UMI Microform 3230393, pp. 1-56, 2006.
- [5] 조개화, 종석화, 광학 (하권) (China) pp. 142-158, 1984.
- [6] U. Schnars, W. Jüptner, "Digital Holography," (Springer-Verlag, Berlin Heidelberg,) pp. 1-62, 2009.
- [7] http://en.wikipedia.org/wiki/Mach-Zehnder_interferometer
- [8] <http://www.avsupply.com/details/p200.html>
- [9] www.sinepatterns.com
- [10] J. W. Goodman, "Introduction to Fourier Optics," (Third ed.) pp. 49-50, 2009.
- [11] O. K. Ersoy, "Diffraction, Fourier Optics and Imaging," (John Wiley & Sons, Inc., USA,) pp. 57-210, 2007.
- [12] U. Schnars and W. P. O. Jüptner, "Digital recording and numerical reconstruction of holograms," Meas. Sci. Technol. vol. 13, pp. 85-101, 2002.
- [13] T. M. Kreis, "Frequency analysis of digital holography with reconstruction by convolution," Opt. Eng. vol. 41, no. 8, pp. 1829-1838, 2002.
- [14] T. C. Poon, "Optical scanning holography," (Springer, New York,) pp. 33-36, 2007.
- [15] 김성규, Digital Holography 개념 및 응용, 2008.
- [16] E Cuhe, P Marquet, and C Depeursinge, "Spatial filtering for zero-order and twin-image elimination in digital off-axis holography," Appl. Opt, vol. 39, no. 23, pp. 4070-4075, 2000.
- [17] P. Langehanenberg, B. Kemper, and G. Bally, "Autofocus algorithms for digital-holographic microscopy," Biomedical Optics, vol. 6633, pp. 66330E1-66330E9, 2007.

- [18] X. Y. Liu, W. H. Wang, and Y. Sun, “Autofocusing for Automated Microscopic Evaluation of Blood Smear and Pap Smear,” Proceedings of the 28th IEEE / EMBS Ann. Int. Con. / New York, USA, pp. 4718–4721, 2006.

저작물 이용 허락서

학 과	광기술공학과	학 번	20077791	과 정	석사
성 명	한글 한 성	한문 韓 星	영문 Xing Han		
주 소	광주 광역시 동구서석동 조선대학교 그린빌리지 남학사				
연락처	E-mail : iamhanxing@hotmail.com				
논문제목	한글 : 디지털 홀로그램의 자동초점 조절 및 재생 알고리즘 연구				
	영문 : Study on Reconstruction and Autofocusing Control Algorithm of a Digital Hologram				
<p>본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건 아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.</p> <p style="text-align: center;">- 다 음 -</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함. 2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집과 형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함. 3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함. 4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함. 5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함. 6. 조선대학교는 저작물 이용의 허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음. 7. 소속 대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함. <p style="text-align: center;">동의여부 : 동의(<input checked="" type="checkbox"/>) 반대(<input type="checkbox"/>)</p> <p style="text-align: center;">2009년 8월 25일</p> <p style="text-align: right;">저작자: 한 성 (인)</p> <p style="text-align: center; font-size: 1.2em;">조선대학교 총장 귀하</p>					