

(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(51) Int. Cl.⁷
G03H 1/02

(11) 공개번호 특2001-0013717
(43) 공개일자 2001년02월26일

(21) 출원번호	10-1999-7011732		
(22) 출원일자	1999년12월11일		
번역문제출일자	1999년12월11일		
(86) 국제출원번호	PCT/US1998/11947	(87) 국제공개번호	WO 1998/57234
(86) 국제출원출원일자	1998년06월09일	(87) 국제공개일자	1998년12월17일
(81) 지정국	AP ARIPO특허 : 케냐 레소토 말라위 수단 스와질랜드 우간다 가나 감비아 짐바브웨		
	EA 유라시아특허 : 아르메니아 아제르바이잔 벨라루스 키르기즈 카자흐스탄 몰도바 러시아 타지키스탄 투르크메니스탄		
	EP 유럽특허 : 오스트리아 벨기에 스위스 독일 덴마크 스페인 프랑스 영국 그리스 아일랜드 이탈리아 룩셈부르크 모나코 네덜란드 포르투갈 스웨덴 핀란드 사이프러스		
	OA OAPI특허 : 부르키나파소 베냉 중앙아프리카 콩고 코트디부아르 카메룬 가봉 기네 말리 모리타니 니제르 세네갈 차드 토고		
	국내특허 : 알바니아 아르메니아 오스트리아 오스트레일리아 아제르바이잔 보스니아-헤르체고비나 바베이도스 불가리아 브라질 벨라루스 캐나다 스위스 중국 쿠바 체코 독일 덴마크 에스토니아 스페인 핀란드 영국 그루지야 헝가리 이스라엘 아이슬란드 일본 케냐 키르기즈 북한 대한민국 카자흐스탄 스리랑카 라이베리아 레소토 리투아니아 룩셈부르크 라트비아 몰도바 마다가스카르 마케도니아 몽고 말라위 멕시코 노르웨이 뉴질랜드 슬로베니아 슬로바키아 타지키스탄 투르크메니스탄 터키 트리니다드토바고 우크라이나 우간다 미국 우즈베키스탄 베트남 폴란드 포르투갈 루마니아 러시아 수단 스웨덴 싱가포르 가나 감비아 기네비소 인도네시아		
(30) 우선권주장	08/873,252 1997년06월11일 미국(US)		
(71) 출원인	룩히드 마틴 에너지 리서치 코퍼레이션		
(72) 발명자	미국 37831 테네시 오우크 리지 스카보로 로드 701 토마스클라렌스이. 미국테네시37920녹스빌블러프포인트드라이브3601 베일러래리알. 미국테네시37922녹스빌라크메도우드라이브616 한슨그레고리알. 미국테네시37716클린톤오퍼드로드624 라스우쎌데이비드에이. 미국테네시37922녹스빌딕세뷰드라이브415 보엘클에드가 미국테네시37830오우크리지윈드하벤레인14 카스트라케인제임스 미국뉴욕12208알바니멀틀에버뉴852 심쿨레트미첼 미국뉴욕12110라담존슨로드25비 클로우로렌스 미국뉴욕12188워터포드마운틴뷰드라이브30		
(74) 대리인	박장원		

심사청구 : 없음

(54) 디지털 방식의 홀로그래피, 홀로그래피 간섭법, 및 홀로비전

요약

디지털 방식의 홀로그래피에 대한 시스템과 방법들이 기술된다. 레이저(210); 레이저에 광학적으로 연결된 빔스프리터(240); 빔스프리터에 광학적으로 연결된 기준 빔 반사경(290), 빔스프리터에 광학적으로 연결된 오브젝트(260), 기준 빔 반사경과 오브젝트에 광학적으로 연결된 포커싱 렌즈(270); 및 포커싱 렌즈에 광학적으로 연결된 디지털 기록기를 포함하는 장치. 기준 빔은 기준 빔 반사경에 법선이 아닌 각도로 입사하고, 그리고 기준 빔과 오브젝트 빔은 이미지를 형성하기 위해서 포커싱 렌즈에 의해 디지털 기록기의 초점 평면에 포커싱된다. 이 시스템과 방법들은 컴퓨터 보조 홀로그래피 측정이 이루어질 수 있다는 이점을 제공한다.

대표도

도2

명세서

기술분야

본 발명은 일반적으로 홀로그래피(holography) 분야에 관한 것이다. 특히, 본 발명은 디지털 방식의 홀로그램(hologram) 획득 및 (즉, 어떤 필름이나 감광판도 없는)재생 시스템에 관한 것이다. 본 발명의 양호한 실시예에서, 홀로그램 획득은 전하 결합 소자(CCD) 카메라에 근거한다. 따라서, 본 발명은 홀로그래피 시스템에 관한 것이다.

배경기술

통상적인 홀로그래피 방법은 홀로그램⁽¹⁾을 기록하기 위해 필름 또는 홀로그래피 감광판(홀로그래피를 위해 최적화된 사진 에멀션(emulsion)을 갖는 유리 감광판)을 이용하였다. 재생은 아날로그 방법으로 레이저(또는 몇몇 경우에는 백색광) 및 최초 기록된 홀로그램 또는 그것의 복사본을 이용하여야만 가능하다. 이들 아날로그 방법들은 느리고, 번거롭고, 그리고 비싸다.⁽⁴⁾ 또한 전송하여 또다른 위치에서 재생할 수 있는 전자 신호들로 바꿀 수 있는 방법이 없다. 그것은 항상 하드카피(hard copy)를 보내는 것이 필요하다. 더욱 나쁜 것은, 필름을 처리하는데 소요되는 시간 지연이 홀로그래피 이용을 방해하고 그리고 여러 가지 상황에서 홀로그래피 변형을 방해한다. 전통적인 홀로그래피 시스템 비용 자체는 허용될 수 있지만, 필름 처리의 필연성에 의해 야기된 시간 지연 및 저 스루풋(throughput)은 절대 허용될 수 없는 지연과 관련된 대가를 치르게한다(예컨대, 타이어 제조업자는 소정 타이어가 흠집을 가졌는지를 아는 데는 45분, 또는 단지 2분도 허용할 수 없다).

도1을 참조하면, 통상적인 사이드밴드(sideband) 홀로그래피 시스템 기록 기하학이 도시된다.⁽²⁻³⁾ 레이저(110)로부터의 빛은 빔 익스펜더(beam expander)(120)에 의해 소진된다. 렌즈(130)를 통과한 후에, 빛은 빔스플리터(beamsplitter)(140)에 의해 2개의 성분으로 분리된다. 이 빔스플리터(140)는 예컨대 90%의 반사율을 갖는다. 오브젝트(object) 빔(150)을 구성하고 있는 반사된 빔은 전방으로 진행하고 그리고 반사경(160)에 의해 반사된다. 오브젝트 빔(150)은 그다음, 오브젝트(170)로 진행한다. 그다음, 오브젝트 빔(150)은 홀로그래피 감광판(190) 위에 입사된다.

한편, 렌즈(130)로부터 빔스플리터(140)를 통해 전송되는 빛의 일부분은 전방으로 진행하여 반사경(200)에 의해 반사되는 기준 빔(180)을 구성한다. 그다음, 반사된 기준 빔은 홀로그래피 감광판(190) 위에 입사된다.

보다 최근에, 비록 아날로그 방법이라는 하지만, 홀로그래피 간섭계가 개발되었다.⁽⁵⁾ 이것은 초점 홀로그래피 개발을 포함한다.⁽⁶⁻⁷⁾

이 출원서 내에는 괄호 내의 아라비아 숫자들로 구성된 첨자들로 여러개의 공개 문헌들이 언급되어 있다. 이들 및 다른 공개물들에 대한 전문 인용이 청구항 바로 앞의 명세서 끝에서 발견될 것이다. 모든 이들 공개 문헌들은 본 발명의 배경기술을 표시하고 그리고 기술 상태를 예시하기 위한 목적에서 본 출원에 개시하는 것이다.

발명의 요약

따라서, 1) CCD 카메라 또는 디지털 컴퓨터 인터페이스를 갖는 소정의 비디오 카메라에 홀로그램을 직접 기록하고 그리고 2) 홀로그램을 디지털 저장 매개물(예컨대, RAM, 하드 드라이브, 테이프, 기록할 수 있는 CD 등)에 저장하기 위한 특별한 방법이 요구된다. 이 방법을 실행하기 위한 장치들의 중요한 특성은 기준 빔과 오브젝트 빔 사이의 매우 작은 각도를 이용하고 그리고 이미지를 간략화하기 위해서 홀로그램을 이미지 평면상에 집중시키는 단계를 포함한다. 부가적으로, 본 발명은 1) 홀로그램의 위상이나 진폭을 2차원 디스플레이 상에 디스플레이하는 방법 그리고 2) 광학적으로 액티브한 크리스탈(active crystal)과 레이저를 완전하게 이용하여 홀로그램을 재생하는 방법을 포함한다. 대조적으로, 종래 기술은 광 홀로그램을 전자적으로(디지털로) 기록하는 방법에 대한 설명을 포함하지 않으며, 광 홀로그램을 재생 또는 방송하는 것은 더욱 그러하다.

본 발명의 이들 및 다른 양상들은 아래 설명과 수반하는 도면을 참조하여 고려할 시 보다 잘 인식되고 평가될 것이다. 그러나, 아래 설명은 본 발명의 양호한 실시예와 그것의 많은 구체적인 설명을 나타내는 동시에, 한정적인 것이 아니라 예시적인 방법으로 주어진다라는 것이 이해되어야 한다. 많은 변경 및 수정들이 본 발명의 정신으로부터 벗어나지 않고도 그것의 영역 내에서 실행될 것이고 그리고 본 발명은 모든

그러한 수정들을 포함한다.

도면의 간단한 설명

본 발명을 구성하는 이점 및 특성들 그리고 본 발명에 제공된 모델 시스템들의 동작과 부품에 대한 명확한 개념은, 이 명세서의 일부분을 이루고 있고 그리고 이것을 수반하는 도면들에 설명된 실시예들을 참조하여 보다 명백해질 것이며, 이 실시예들은 한정적인 것이 아니라 모범적인 예들이며, 같은 기준 숫자들은 여러 곳에서 바라본 동일 성분들을 나타낸다. 도면들에 설명된 특성들은 반드시 치수에 맞게 그려질 필요는 없다.

도1은 "종래 기술"로 이름 붙은 통상적인 (Leith & Upatnieks)사이드밴드 홀로그래피 시스템의 구성도를 도시한다.

도2는 본 발명의 실시예를 나타내는 단순하지만 디지털 방식의 홀로그래피 시스템의 구성도를 도시한다.

도3a는 본 발명의 실시예를 나타내는 "Michelson" 기하학의 디지털 방식의 홀로그래피 셋업(setup)의 투시도를 도시한다.

도3b는 도3a에 도시된 디지털 방식의 홀로그래피 셋업의 또하나의 투시도를 도시한다.

도4는 본 발명의 실시예를 나타내는 반사경 내의 스크래치(scratch)에 대한 디지털로 획득된 홀로그램을 도시한다.

도5는 도4에 대한 2차원 푸리에(Fourier) 변환 플롯(plot)을 도시한다.

도6은 도4 홀로그램으로부터 홀로그램 위상 데이터의 재생을 도시한다.

도7은 본 발명의 실시예를 나타내는 홀로그래피 재생 시스템의 구성도를 도시한다.

도8은 본 발명의 실시예를 나타내는 것으로서, 비결정질 탄소 필름 상의 금 입자의 홀로그램에 대한 선택된 영역을 도시한다.

도9는 본 발명의 실시예를 나타내는 것으로서, 도8(중심 영역: 오토코릴레이션(autocorrelation), 왼쪽 및 오른쪽 영역: 사이드밴드) 홀로그램의 푸리에 변환 계수의 선택된 영역을 도시한다.

도10a는 Scherzer 초점에서의 콘트라스트(contrast) 전달 함수를 도시한다.

도10b는 본 발명의 실시예를 나타내는 Gabor 초점에서의 특별한 홀로그래피 전달 함수를 도시한다.

도11은 본 발명의 실시예를 나타내는 것으로서, 샘플링 비율 $s=4.66$ (불연속적인 푸리에 변환에서 디스플레이 점들의 수는 32이다)로 32개의 점들에서 샘플링된 코사인(cos) 패턴의 불연속적인 푸리에 변환 계수를 도시한다.

도12는 본 발명의 실시예를 나타내는 것으로서, 식(6)(코사인 패턴은 도11의 데이터와 (실제 공간에서) 동일한 영역으로 제한되고 그리고 이 도면의 상세한 것들 중 어떤 것도 도11에서 발견될 수 없다)을 따르는 코사인 패턴의 분석적인 푸리에 변환 계수를 도시한다.

도13은 본 발명의 실시예를 나타내는 것으로서, 코사인 패턴(디스플레이 점들의 최초 집합은 도11에서 처럼 32였고, 매개변수 π 는 17으로 선택하고, 확장된 푸리에 변환에서 디스플레이 점들의 수는 512이고 그리고 분석적인 푸리에 변환에서 보여지는 것들과 동일한 상세한 것들을 보여준다)의 확장된 푸리에 변환 계수를 도시한다.

도14는 본 발명의 실시예를 나타내는 것으로서, 전형적인 불연속적인 푸리에 변화의 디스플레이를 허락하지만 소량의 픽셀(pixel)에 의해 이동된(도11과 동일한 코사인 패턴이 이용되고, Δk (그리고 2차원인 $\Delta 1$)에 대해 실제 값들을 선택함으로써, 피크(peak)가 디스플레이 점 위에 직접적으로 위치하도록 푸리에 공간에서 적어도 하나의 피크를 디스플레이하는 것이 가능하고, 이 경우에 사이드로브(sideloobe)는 사라진다(오른쪽 피크를 참조)) 확장된 푸리에 알고리즘의 결과를 도시한다.

도15는 본 발명의 실시예를 나타내는 것으로서, 실제로 중앙에 집중되지 않는 사이드밴드로부터 진폭을 재구성함으로써 이미지를 인위적인 구조로 야기한다(최악의 경우는 사이드밴드의 중심이 푸리에 공간의 디스플레이 점들 사이에 정확히 위치할 때이다).

발명의 상세한 설명

본 발명 및 이것의 여러가지 특성들과 유익한 사항들은 수반하는 도면들에서 설명되고 아래 설명에서 상세히 기술되는 비제한적인 실시예들을 참조하여 보다 충분히 설명될 것이다. 잘 알려진 부품들 및 프로세싱 기술들에 대한 설명은 너무 세부적으로 설명되어 본 발명을 쓸데없이 불명확하게 하지 않도록 생략된다.

1. 시스템 개요

디지털 홀로그래피가 지금까지 개발되지 않은 이유는 디지털 비디오 카메라 또는 디지털 미디어에 채택될 수 있는 카메라의 해상도가 지금까지 전통적인 홀로그램들의 고유 성질인 매우 높은 공간 주파수를 기록할 만큼 충분히 좋지 않기 때문이었다. 본 발명은 이러한 어려움을 극복하는 여러가지 기술들을 결합하여, 푸리에 변환 홀로그램 분석용 기록 카메라의 고유의 홀로그래피 해상도에 이르기까지 그들의 모든 공간 주파수들과 홀로그램 기록을 허락하다.

광 홀로그램을 디지털로 기록하는 방법을 실현하는 것이 필요하였다(현재 그것은 홀로그램이다). 또한, 간섭계 및 전자 홀로그래피에 이용된 푸리에 변환 기술들이 홀로그램을 분석하는데 이용될 수 있음을 깨닫는 것 또한 필요하였다. 평면파를 디지털 홀로그램에 수학적으로 부가하고 그리고 결과 인텐서티

(intensity) 함수를 광학적으로 민감한 크리스탈에 기록함으로써, 최초 사이드밴드 홀로그램을 생성하는데 이용된 각도와는 다른 (보다 큰) 회절각(α)으로 홀로그램을 실제 재생하여 준다는 것을 깨닫는 것 또한 필요하다.

2. 양호한 실시예들의 상세한 설명

도2를 참조하면, 단순한 디지털 방식의 홀로그래피 시스템이 홀로그램들을 디지털 방식으로 기록 및 재생하도록 결합된 하드웨어 개념을 설명하기 위해 도시된다. 레이저(210)로부터의 빛은 빔 익스팬더/공간 필터(220)에 의해 확장된다. 그다음, 확장/필터링된 빛은 렌즈(230)를 통해 진행한다. 그다음, 이 빛은 빔 스플리터(240)로 진행한다. 빔 스플리터(240)는 예컨대 50%의 반사율을 갖을 수 있다. 빔 스플리터에 의해 반사된 빛은 오브젝트(260)로 진행하는 오브젝트 빔(250)을 구성한다. 오브젝트(260)로부터 반사된 빛의 일부는 빔 스플리터(240)를 통해 통과한 다음 포커싱(focusing) 렌즈(270)로 진행한다. 그다음, 이 빛은 (도시되지 않은)전하 결합 소자(CCD) 카메라로 진행한다.

한편, 렌즈(230)로부터 빔 스플리터(240)를 통해 통과한 빛의 일부는 기준 빔(280)을 구성한다. 기준 빔(280)은 작은 각도로 반사경(290)으로부터 반사된다. 반사경(290)으로부터 반사된 기준 빔은 그다음 빔 스플리터(240)로 진행한다. 반사된 기준 빔의 일부는 빔 스플리터(240)에 의해 반사된 다음, 포커싱 렌즈(270)로 진행한다. 포커싱 렌즈(270)로부터의 기준 빔은 그다음 CCD 카메라로 진행한다. 포커싱 렌즈(270)로부터의 오브젝트 빔과 포커싱 렌즈(270)로부터의 기준 빔은 동시에 존재하는 복수의 기준 및 오브젝트 파(300)를 함께 구성한다.

도2를 도1과 비교하면, 기꺼해야 아래에서 언급될 차이는 필름 또는 사진 감광판을 이용하는 대신에 CCD 카메라가 홀로그램을 기록하게 하는 것임을 알 수 있다. 1) 본 발명은 고해상도 CCD(예컨대, 140만개의 픽셀들)를 이용한다(별써 6천만개가 넘는 픽셀들을 갖는 CCD가 이용되고 있다). 2) 본 발명은 "Michelson" 기하학(빔 스플리터, 기준 빔 반사경, 및 CCD의 기하학적인 관계가 Michelson 간섭계 기하학을 닮았다)을 이용한다. 이 기하학이 기준 빔과 오브젝트 빔이 매우 작은 각도로 결합되게 하여준다(기준 빔 반사경은 홀로그램의 푸리에 분석을 위해 공간적으로 헤테로다인(heterodyne)한 또는 사이드밴드 프링지(fringes)들을 만드는 작은 각도를 생성하도록 기울어진다). 3) 본 발명은 오브젝트를 CCD의 초점 평면상에 포커싱하기 위해 포커싱 렌즈를 이용한다. 이 렌즈는 또한 서로 다른 초점 길이를 갖는 렌즈를 이용하고 그리고 대응하는 공간 기하학을 조정하여(예컨대, 이미지 거리에 대한 오브젝트 거리의 비율) 원하는 대로 확대 또는 축소한다. 전송된 3가지 요소들이 문헌에 공지된 푸리에 변환 소프트웨어 분석 방법과 결합될 시, 홀로그램을 디지털 방식으로 직접 기록 및 재생하게 하여준다.⁽¹⁰⁻¹²⁾

이 시스템은 홀로그래피 이미지를 실시간으로 기록 및 재생하거나, 또는 후에 재생할 수 있도록 이들을 저장하기에 적당하다. 홀로그램들이 디지털로 저장되기 때문에, 일련의 홀로그램들은 홀로그래피 영화를 생성하도록 만들어 질 수 있고, 또는 홀로그램들은 홀로그래피 텔레비전(홀로비전(HoloVision))을 제공하기 위해서 원격 지점에서 재생을 위해 전자적으로 방송될 수 있다. 홀로그램은 진폭과 위상을 저장하고, 이 위상은 파장과 광경로 길이에 직접적으로 비례하기 때문에, 이 디지털 방식의 홀로그래피는 또한 정밀 부품, 조립체 등의 형태와 치수를 검증하기 위한 극히 정밀한 측정 툴로서 역할을 할 수 있다. 유사하게, 홀로그램을 디지털로 직접적으로 저장하는 능력은 디지털 홀로그래피 간섭계에 대한 방법을 제공한다. 동일 오브젝트의 홀로그램들은, 소정의 물리적인 변경(압력, 온도, 마이크로 기계 등)을 한 후에, 이 변경(파장에 직접적으로 비례하는 위상 변경)에 대한 물리적인 측정치를 계산하도록 서로로부터 감산(위상에 대한 직접적인 감산)될 수 있다. 유사하게, 오브젝트들 각각의 홀로그램을 감산함으로써 제1 또는 마스터 오브젝트로부터 제2 오브젝트의 이탈을 측정하기 위해서, 한 오브젝트가 유사한 오브젝트와 비교될 수 있다. x-y 평면에 있는 2개의 픽셀들 위의 z 평면에서 2π 보다 큰 위상 변경을 명확히 측정하기 위해서, 홀로그램들은 하나의 파장 이상으로 기록되어야 한다(2개 주파수 간섭계에 대한 토론이 문헌에 공지되었기 에 여기서는 반복되지 않을 것이다).

본 발명은 고해상도 비디오 카메라의 이용과, 오브젝트 이미지를 기록(카메라)평면에 묘사하며 홀로그래피 오브젝트 및 기준 파들을 섞는(분해될 시 프린지 당 적어도 2개의 픽셀과 공간 피쳐(feature) 당 적어도 2개의 프린지를 초래하는 각도로 섞는) 매우 작은 각도와, 및 (모든 픽셀들에 대해 각각 기록된 위상과 진폭을 갖는 이미지)홀로그래피 이미지를 기록 가능하게 만들기 위해서 공간적으로 저 주파수인 헤테로다인(사이드밴드)홀로그램의 푸리에 변환 분석을 결합한다. 부가적으로, 애퍼처 스태프(aperture)은, 이미징 시스템에 의해 분석될 수 있는 것보다 높은 소정 주파수들의 에일리어싱(aliasing)을 방지하기 위해서, 오브젝트 포커싱 관련된 하나 이상의 렌즈들의 후면 포컬 평면에 이용될 수 있다(에일리어싱은 문헌에 자세히 설명되며, 그리고 존재하는 공간 주파수들을 제한하기 위해서 애퍼처 스태프를 렌즈의 후면 포컬 평면에 배치함으로써, 보다 잘 설명되고 이해될 것이다). 오브젝트의 모든 공간 주파수들이 이미징 시스템에 의해 분석될 수 있는 경우에는 어떤 애퍼처 스태프들도 필요하지 않다. 일단 기록되면, 홀로그래피 이미지들을 2차원 디스플레이상에 3차원 위상 또는 진폭 플롯들로 재생하거나, 또는 최초 이미지를 재생하기 위해서 위상 변경 크리스탈 및 백색광 또는 레이저 빛을 이용하여 최초의 완벽하게 기록된 파(wave)를 재생하는 것이 가능하다. 최초 이미지는 이 이미지를 레이저로 위상 변경 매개물에 기록하여 재생되고, 그리고 백색광 또는 또다른 레이저가 이 이미지를 재생하는데 이용될 수 있다. 이미지를 3색광 레이저로 기록하고 그리고 재생된 이미지를 결합함으로써, 천연색 홀로그램을 만드는 것이 가능하다. 일련의 이미지를 연속적으로 기록 및 재생함으로써, 홀로그래피 영화를 형성하는 것이 가능하다. 이들 이미지들이 디지털로 기록되기 때문에, 그들은 무선 주파수(RF) 파(예컨대, 마이크로웨이브) 또는 적당한 디지털 인코딩(encoding) 기술을 이용하여 파이버나 케이블로 이루어진 디지털 네트워크를 통해 방송될 수 있으며, 그리고 원격지에서 재생될 수 있다. 이것이 홀로그래피 텔레비전 및 영화 또는 "홀로비전"을 실제로 가능케 한다.

오브젝트를 CCD 초점 평면상에 포커싱하는 렌즈 이용과 관련하여, 점의 회절 패턴은 패턴의 중심으로부터 거리가 증가함에 따라 점점 더 가까운 프린지들을 갖는 구면 함수에 의해 설명될 수 있다. 이들 프린지들이 서로 점점더 가까워짐에 따라, 그들은 비디오 카메라에 의해 분석될 수 없게된다. 더욱 안좋은 것은, 복잡한 오브젝트로부터 발생하는 이들 점 회절 패턴들의 상호작용은 불가능할 정도의 조밀하고 복잡한 패턴을 생성하므로, 상기 패턴은 비디오 카메라에 의해 어느 곳도 분석될 수 없다. 오브젝트를 기록 평면상

에 포커싱함으로써 이들 회절 패턴들을 제거할 수 있으며, 즉 현재의 고해상도 비디오 카메라는 적당한 충실도를 갖는 홀로그래프를 기록할 수 있다.

기록 매개물이 100 lines/mm 를 분석할 수 있는 경우, 홀로그래피 해상도는 대략 16 lines/mm 이거나, 또는 확대 비율 1에서 50마이크론 정도일 것이다. 이 한계는 확대 렌즈를 이용하여 증가될 수 있다. 100 lines/mm 의 카메라 해상도에 대해, 홀로그래프 해상도는 확대 비율 10 이 이용되는 경우 대략 160 lines/mm 정도일 것이다. 유사하게, 공간 해상도는 최초 이미지를 기록 카메라상에 축소하는 소정의 축소 비율에 따라 감소될 것이다.

본 발명은 몇몇 대체 접근법들로도 구현될 수 있다. 예를 들면, 본 발명은 각각의 픽셀에 대한 홀로그래프 위상과 진폭을 얻는데 헤테로다인 보다는 위상 이동을 이용할 수 있다. 위상 이동 간섭계는 문헌에 잘 기록되어 있다. 또다른 예제로서, 본 발명은 인텐서티 패턴을 광학적으로 민감한 크리스탈에 기록하는 많은 다른 방법들을 이용할 수 있다. 이들은 (공간 빛 변조기를 이용하는 것이 아니라) 급격하게 포커싱된 스캐닝 레이저 빔을 이용하는 단계, 바이어싱(biasing) 레이저 빔없이 공간 빛 변조기(SLM)를 갖고 기록하는 단계, 및 기록 구조에 대한 많은 가능한 기하학적인 변형들을 포함한다. 또하나의 예제로서, 본 발명은 홀로그래프를 재생할 회절 격자를 생성하기 위해서 위상 변경 이외의 다른 광학 효과들이 이용되는 광학적으로 민감한 크리스탈을 이용할 수 있다. 또하나의 예제로서, 본 발명은 실제로 인텐서티 패턴을 생성하기 위해서 매우 미세한 픽셀로 이루어진 공간 빛 변조기를 이용할 수 있으며, 이에 따라 인텐서티 패턴을 홀로그래프 재생용의 광학적으로 민감한 크리스탈에 기록하는데 있어서 소정의 문제들을 미연에 방지할 수 있다.

예제

본 발명의 특정 실시예는 상세한 여러가지 중요한 특성들을 설명하는 역할을 하게될 아래의 비제한적인 예에 의해 기술될 것이다. 예제는 본 발명을 실행하는 방법에 대한 이해를 돕고 그리고 당업자들이 본 발명을 실행하게끔 하는데 목적이 있다. 따라서, 예제는 본 발명의 영역을 한정하는 것으로 해석되서는 안 될 것이다.

도3A는 디지털 방식의 홀로그래피의 모범적인 "Michelson" 기하학의 투시도를 보여준다. 레이저 빛은 빔 스플리터(310)로 제공된다. 빔 스플리터(310)로부터 오는 오브젝트 빔은 반도체 웨이퍼 마운트(mount)(320)로 진행하고, 그다음 포커싱 렌즈(330)로 진행한다. 반면, 빔 스플리터(310)로부터 오는 기준 빔은 압전(piezoelectric) 기준 빔 반사경 마운트(340) 위에 장착된 기준 빔 반사경으로 진행한다.

도3B는 모범적인 기록용 "Michelson" 기하학의 또하나의 투시도를 보여준다. 이 도면에서, 장치의 다른 하부 부품들에 관해 디지털 방식의 CCD 카메라(350)의 위치가 보다 쉽게 인식될 수 있다. 이 도면에서, 오브젝트 목표 마운트(360)의 위치는 보다 쉽게 인식될 수 있다. 도4는 반사경(이 경우에는 오브젝트) 내 스크래치에 대한 헤테로다인(사이드밴드)홀로그래프이다. 홀로그래프는 도3A-3B에서 설명되고 그리고 전술된 디지털 홀로그래피 시스템으로 직접 만들어진다. 홀로그래프에서 관측될 수 있는 프린지들은 기준 및 오브젝트 빔들 사이의 간섭에 기인한다. 기준 빔 반사경은 이들 프린지들을 생성하기 위해서 조금 기울어진다. 이들 프린지들이 존재함으로써 홀로그래프의 푸리에 변환 분석이 홀로그래프의 픽셀들에 대한 위상과 진폭을 계산하게 하여준다. 푸리에 변환 분석은 아래에서 보다 상세히 토론될 것이다.

도5는 도4 2차원 푸리에 변환의 도식적인 플롯이다. x축은 x 차원을 따라 존재하는 공간 주파수 축이고 그리고 y축은 y 차원을 따라 존재하는 공간 주파수 축이다. 실제 데이터 자체는 주파수 공간(f_x, f_y)에서 특정 공간 주파수의 세기에 대응하는 수들로 이루어진 매트릭스이다. 하얀색 도트(dot)들의 수와 밝기는 도4에 제공된 공간 주파수들의 주파수 공간에서의 세기와 위치를 보여준다. 기준 빔 프린지들이 실제 및 가상 홀로그래프 이미지들을 축을 벗어나게 하고 그리고 주파수 공간에서 그들이 분리되게 하는 헤테로다인 국부 오실레이터로서 작용한다는 것을 도5로부터 알 수 있다. 적어도 프린지당 2개의 픽셀들이 프린지를 분석하는데 요구됨을 Shannon 이론(또는 나이퀴스트(Nyquist) 한계)으로부터 알 수 있고, 그리고 분석할 수 있는 피처당 적어도 3개의 프린지들이 홀로그래프에서 오브젝트를 분석하는데 요구됨을 전자 홀로그래피로부터 알 수 있다(캐리어 공간 주파수+오브젝트 주파수의 해상도를 허용하기 위해서 피처당 3개 내지 4개의 프린지들을 요구하지만, 그러나 Voelkl과 그밖의 다른 사람들에게 의해 실행된 확장된 푸리에 변환에 대한 연구는 피처당 2개의 프린지들을 이용하게 하여준다). 따라서, 이들 2개의 제한사항들이 홀로그래프에서 피처(공간 주파수)를 분석하기 위해 오브젝트에 요구되는 확대비율과 그리고 기준빔과 오브젝트 빔 사이의 경사각을 결정한다.

도5에 도시된 데이터는 푸리에 공간에서의 축들을 헤테로다인 캐리어 주파수(오브젝트 빔과 기준 빔 사이의 작은 각도의 기울기에 의해 야기된 공간 주파수)의 정상에 있도록 변환하여(이동시키어) 분석되며, 그다음 최초 원점 주위의 신호들을 컷오프(cut off)하기 위해서 디지털 필터(예컨대, 하닝(Hanning) 또는 (Butterworth filter))를 적용하며(이들은 실제로 상기 신호와 상호작용하는 기준빔으로부터 그리고 상기 신호와 상호작용하는 오브젝트 빔으로부터 생성되는 신호들이고, 그리고 홀로그래프 권지에서 보면 단지 잡음이다), 그다음 역 푸리에 변환을 실행한다. 이러한 모든 분석은 디지털 컴퓨터상에서 실행될 수 있고 그리고 실시간으로 수행될 수 있다. 실시간 분석은 초당 30프레임의 프레임 비율을 성취하기 위해서 30 내지 100개 정도의 고성능 병렬 처리기들(예컨대, Pentium Pro 또는 DEC Alpha)을 요구한다. 이러한 크기의 컴퓨터 시스템들은 일반적으로 현재 커다란 데이터베이스 서버 및 주식시장 계산 엔진들로서 이용된다. 그들은 또한 단기간의 저해상도 날씨 예보에 적합하고, 그리고 영화산업용 이미지 처리와 생성에 적합하다. 그러한 시스템들은 6 내지 10 년 내에 데스크탑 시스템이 될 수 있을 것으로 기대된다.

도6은 전술된 도5의 데이터(홀로그래프)에 대한 분석을 실시하여 생성된 위상 데이터의 재생을 보여준다. 데이터를 실제 홀로그래프로서 재생하는 일은 광학 시스템에서 회절 격자의 생성과 그리고 레이저 빛(또는 적당하게 처리된 백광)을 가지고 정확한 각도로 회절 격자를 조명하는 것을 필요로한다. 실제로 광학적으로 민감한 크리스탈에 기록된 데이터는 함수 $f(x, y, z_0)$ 를 홀로그래프 데이터의 각각의 픽셀 $h(x, y, z_0)$ 에 부가하여 홀로그래프 데이터로부터 계산되며, 여기서 두 함수들은 복소수이며,

$$f(x,y) = e^{ik\cos(\alpha)r}$$

r 은 $x^2 + y^2 + z_0^2$ 의 제곱근이다.

위에 부가된 지수 함수의 물리적인 의미는 최초 홀로그램의 오브젝트 파와 각도(α)로 교차하는 평면파를 부가하는 것을 의미한다. 이 합으로 생성된 함수는 인텐서티 함수의 절대값을 형성하도록 자신의 복소 공역으로 곱하여 지며, 이는 레이저로 빛에 민감한 크리스탈에 기록된다(오브젝트와 기준파의 x 로 이루어진 인텐서티함만을 기록하는 것이 가능하며, 오토코릴레이션 항들은 버린다). 따라서 빛에 민감한 크리스탈에 생성된 회절 격자는 최초 홀로그램을 재생하기 위해서 레이저 빛이 각도(α)로 조명될 수 있다. 레이저 빛으로 기록될 시 일시적인 위상 변경이나 굴절 지수 변경이 일어나는 크리스탈이 사용되는 경우, 그 다음 순간적으로 획득되거나 저장된 홀로그램들로부터 새로운 이미지를 연속적으로 기록하고 그리고 또다른 레이저(또는 적당하게 처리된 백광)로부터의 레이저 빛을 가지고 각각의 이미지를 각도(α)로 조명함으로써, 3차원 영화 또는 3차원 텔레비전 이미지가 생성될 수 있다. 이것은 광학적으로 민감한 크리스탈에 홀로그래피 이미지를 기록한 다음 이미지를 재생하기 위한 단지 가능한 한 가지 방법이지 가능한 유일한 방법은 아니다.

도7은 본 발명을 이용하여 영화 또는 텔레비전을 만들기 위한 방법을 묘사한다. 홀로그램은 크리스탈에 2개의 레이저 빔을 교차시켜서 위상 변경 또는 다른 광학적으로 액티브한 크리스탈에 기록된다. 레이저 빔(1)은 홀로그램 인텐서티 패턴을 전송된 최초의 홀로그램으로부터 수학적으로 생성된 인텐서티 함수로 변조하기 위해서 SLM(spatial light modulator:공간 빛 변조기)을 통과한다. 포커싱 렌즈는 위상 변경 크리스탈의 이러한 패턴을 레이저 빔(1)과 레이저 빔(3)의 교차점에 포커스하며, 이들 2개 레이저들의 결합된 인텐서티는 이 패턴을 크리스탈에 기록하기에 적당하다. 이 패턴이 기록된 후에, 각도(α)로 크리스탈에 입사하는 레이저 빔(2)은 최초 홀로그램을 재생한다.

광파 홀로그래피 소개

여기에 기술된 홀로그램 처리 단계들을 보다 쉽게 이해할 수 있도록, 처음에 축을 벗어난 홀로그래피 성질을 간략하게 재검토하는 것이 필요하다. 매우 코히어런트(coherent)한 전자 소스, 예컨대 전계 방출 전자총을 이용하는 전자 소스를 갖춘 전자현미경에서, 견본에 입사하는 전자빔은 이상적으로 평면파다. 실제로, 이것은 조명이 넓은 영역으로 퍼지는 경우, 적당한 근사법으로 성취될 수 있다. 이러한 이상적인 경우에, 현미경 내의 오브젝트는 입사하는 평면파를

$$I_{mn} = \frac{1}{d^2} \int_{(m-1)d}^{md} \int_{(n-1)d}^{nd} I(x,y) dx dy,$$

오브젝트 파 $o(\vec{r})$ 로 수정하며, 이는 다음과 같이 정의된다.

$$o(\vec{r}) = a(\vec{r}) \cdot e^{i\phi(\vec{r})}. \quad (1)$$

$a(\vec{r})$ 과 $\phi(\vec{r})$ 은 실수 함수이고 그리고 오브젝트 진폭과 오브젝트 위상을 각각 묘사한다. 벡터 \vec{r} 은 견본 평면, 또는 (x,y) 평면의 벡터다. 간략화를 위해, 확대 인자들과 이미지 회전이 무시되어, 이미지 평면과 오브젝트 평면의 벡터들이 일치한다.

축을 벗어난 홀로그램을 기록할 시, 오브젝트는 이상적으로 겹프리즘(biprism)의 한쪽 면에만 위치된다. 그다음, 겹프리즘은 이미지 파(또는 실험 셋업에 의존하는 오브젝트 파)를 기준 파와 중첩시키며, 즉 이 파를 겹프리즘의 다른 쪽 면에 위치시킨다(Liche, 1986; Joy와 그밖의 사람들, 1993; Mollenstedt & Duker, 1956; Tonomura, 1993). 이상적으로, 기준파는 견본의 어떤 부분을 통해서도 지나가지 않는 평면파다. 그러나, 이것은 유일한 요구물은 아니며, 그리고 기준파가 견본을 통과하는 경우, 또는 자계나 전계에 의해 변형되는 경우 받아들일 수 있는 결과들이 획득될 것이다. 겹프리즘 아래의 이미지 평면에서, 이미지 인텐서티 $I(\vec{r})$ 를 발견할 수 있다.

(Volkel & Lichte, 1990)

$$I(\vec{r}) = 1 + A^2(\vec{r}) + I^{inel}(\vec{r}) + 2\mu \cdot A(\vec{r}) \cdot \cos(\Delta\vec{k} \cdot \vec{r} + \Phi(\vec{r})) \quad (2)$$

여기서 부가적인 항 $I^{inel}(\vec{r})$ 은 비탄성적으로 산란된 광자를 고려한다. $|\Delta\vec{k}|$ 항은 홀로그래피 프린지들의 공간 주파수를 설명한다. $A(\vec{r})$ 와 $\Phi(\vec{r})$ 은 이미지의 진폭과 위상을 나타내고, 상기 진폭과 위상은 대물렌즈(및 다른 방해 소스원들)의 수차때문에 오브젝트의 진폭 및 위상과 다르다. μ 항은 어떤 오브젝트도 이용되지 않았을 시, 즉 $A=1$, I^{inel} 및 Φ 이 0일 시 간섭 프린지들의 콘트라스트를 나타낸다.

도8에서, 비결정질 탄소 포일(foil)상의 금 입자들의 홀로그램으로부터 선택된 작은 영역이 가섭 프린지들을 보이기 위해 디스플레이된다. 그들은 왼쪽 상측으로부터 이미지의 오른쪽 바닥 구석까지 통용된다.

(복소)이미지 파에 대한 정보를 얻기 위해서, 이미지 인텐서티 $I^{inel}(\vec{r})$ 를 푸리에 변환(FT)하면, 다음과 같은 것을 구할 수 있다.

$$FT\{I(\vec{r})\} = FT\{1 + I^{inel} + A^2(\vec{r})\} + \delta(\Delta\vec{k} - \vec{q}) * FT\{A(\vec{r}) \cdot e^{i\Phi(\vec{r})}\} + \delta(\Delta\vec{k} + \vec{q}) * FT\{A(\vec{r}) \cdot e^{-i\Phi(\vec{r})}\}$$

여기서 *는 컨벌루션(convolution)을 나타낸다.

도8 홀로그램의 푸리에 변환이 도9에 디스플레이된다. 중심 영역은 '오토코릴레이션(autocorrelation)'으로서 공지된 것이고, 이것은 통상적인 이미지의 푸리에 변환에 대응한다. 이 이미지에서 흥미있는 특징들은 오토코릴레이션 주위에서 귀를 닮은 '사이드밴드'다. 자세히 보면, 예컨대 사이드밴드 중심에 관해 중심대칭이 아님을 알 수 있으며, 반대 빔들은 동일한 인텐서티를 갖지 않으므로 인해 수축이 필요하게 된다.

식(3)의 마지막 2줄은 도9의 2개의 사이드밴드에 대응한다. 푸리에 변환으로부터의 사이드밴드들 중 하나를 격리시킴으로서, 복소 이미지 파의 푸리에 변환을 보유하게된다. 색채 수차를 무시함으로써, 복소 이미지 파의 푸리에 변환은 아래 방법에서와 같이 복소 오브젝트 파의 푸리에 변환과 일치한다.

$$FT\{A(\vec{r}) \cdot e^{i\Phi(\vec{r})}\} = FT\{a(\vec{r}) \cdot e^{i\Phi(\vec{r})}\} \cdot e^{i\chi(\vec{q})} \quad (4)$$

여기서 $\chi(\vec{q})$ 항은 아이소플래네틱(isoplanatic) 파 수차를 나타낸다. 여기서, (\vec{q}) 는 푸리에 공간(또는 역수 공간), 즉 대물렌즈의 후면 초점 평면에서의 2차원 벡터다. $\chi(\vec{q})$ 가 공지된 경우, 이 정보가 점 해상도(Tonomura와 그밖의 사람들, 1979; Fu와 그밖의 사람들, 1991)의 향상을 초래하는 $\chi(\vec{q})$ 의 영향을 상쇄시키는데 이용될 수 있음이 이 식으로부터 명백하게 알 수 있다. 이것은 고해상도 크리스탈 구조 이미지들에 대한 해석이 보다 직관적이 되기때문에 바람직하다.

현미경의 점 해상도에 대한 가능한 개선외에, 광파 홀로그래피에 대한 또하나의 중요한 특징은 이미지 위상에 대한 직접적인 접근이다. 신(sin)-함수(Reimer, 1989)로서 도10A에 도시된 통상적인 콘트라스트 전달 함수와는 대조적으로, 오브젝트 위상을 이미지 위상화 하여주는 전달 함수는 코사인 함수로 기술된다. 이 전달 함수가 도10B에 디스플레이된다. 코사인 형 전달 함수의 이점은 넓은 영역의 콘트라스트가 감소되지 않는다는 것과, 그리고 점 해상도가 조금 떨어진다는 것은 별문제로 하고, 전체 정보량이 Gabor 초점(Weirstall, 1989; Lichte, 1991)의 이미지 인텐서티에서 보다 이미지 위상에서 더 많다는 것이다. 이것이 이미지 위상의 직접적인 디스플레이가 몇몇 경우들에 있어서 이미지 인텐서티에 비해 양호하게 되는 이유들 중 하나다.

확장된 푸리에 변환

컴퓨터로 홀로그램을 평가하기 위해 통상적으로 불연속적인 푸리에 광학이 이용된다. 이미지에 대한 불연속적인 푸리에 변환이 최초 이미지와 동일한 정보를 포함할 지라도, 통상적으로 불연속적인 푸리에 변환은 이 일을 실행하는데 이상적인 수단은 아니다.

이것을 설명하기 위해서, 느린 스캔(scan) CCD 카메라로부터 쉽게 구해지는 크기 $N \times N$ 픽셀들로 이루어진 불연속적인 이미지를 고려하자. CCD 카메라의 하나의 픽셀 크기가 치수 $d \times d$ 를 갖고, 그리고 이웃 픽셀들 사이의 거리는 또한 d 이라고 가정하자. 이미지 함수 $I(x,y)$ 는 각 픽셀에서 기록되고, 그리고 다음과 같은 값을 갖는다.

$$I_{m,n} = \frac{1}{d^2} \int_{(m-1)d}^{md} \int_{(n-1)d}^{nd} I(x,y) dx dy, \quad (5)$$

여기서, $m, n=1, \dots, N$ 이다. $I_{m,n}$ 은 픽셀 면적에 대한 적분때문에, 픽셀 $((m-1/2)d, (n-1/2)d)$ 의 중심에서의 함수 $I(x,y)$ 값들과 조금 다르다. 이러한 효과가 다른 것들과 함께 CCD 카메라의 MTF에 기여한다. 이것을 토론하기 위해서, MTF가 보정되었으며 그리고 그에따라 $I((m-1/2)d, (n-1/2)d) = I_{m,n}$ 이라고 가정할 것이다. 또한 잠시동안 $I(x,y)$ 가 다음과 같은 형태를 갖는다고 가정한다.

$$I(x,y) = \cos[2\pi(xu+yv)] \quad (6)$$

이식은 $0 \leq x, y \leq Nd$ 범위에만 해당하고, 그밖의 범위에서는 0이다. 디지털화된 이미지 $I_{m,n}$ 은 다음과 같다.

$$I_{m,n} = \cos\{2\pi[(m-1/2)ud + (n-1/2)vd]\} \quad (7)$$

이식은 $0 \leq m, n \leq N$ 범위에만 해당하고, 그밖의 범위에서는 0이다. 우리는 식(7)에서 공간 주파수에 대한 샘플링 비율 s 로서 정의된 프린지들에 수직인 방향으로 2π 까지 적용되는 것이 필요한 픽셀들의 수를 정의한다.

$$s := \frac{1}{d\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (8)$$

이러한 픽셀들의 수는 정수일 것이 요구된다. 샘플링 이론은 이미지 함수 $I(x,y)$ 가 이미지의 어떤 공간 주파수도 나이퀴스트 한계[12] 아래로 샘플되지 않도록 샘플되는 경우, 이미지 함수는 CCD 카메라 영역 내에 독특하게 정의됨을 설명한다. 즉, 이미지 함수 $I(x,y)$ 에 대한 모든 공간 주파수들이 $s \geq 2$ 로 샘플링 되는 경우, CCD 카메라 영역 내의 정보 $I_{m,n}$ 은 완벽하다. 따라서, $I(x,y)$ 가 예컨대 124×124 또는 13789×13789 개의 샘플링 점들(즉, 디스플레이 점들)로 실수 공간 및 푸리에 공간에서 디스플레이되는 경우에만 디스플레이에 관한 문제가 존재하게 될 것이다. 불연속적인 푸리에 변환 $FT^d\{\dots\}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$FT^d(\dots) = \frac{1}{N} \sum_{m,n=1}^N (\dots) e^{-2\pi i(km + \epsilon)/N} \quad (9)$$

여기서, $N/2 \leq k, l \leq N/2 - 1$ 이다. 도11은 1차원이고 $N=32$ 인 식(7) $FT^d\{I_m\}$ 의 푸리에 변환 계수를 보여준다. 확장된 푸리에 알고리즘에 대한 동기는 최초에 $FT^d\{I_m\}$ 계수 및 식(6) $FT^a\{I(x)\}$ 의 분석 푸리에 변환 계수 사이의 디스플레이 시의 놀라운 차이로부터 온다. 분석 푸리에 변환 FT_a 는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} FT^a\{\dots\} &= \iint_{-\infty}^{\infty} \{\dots\} e^{2\pi i(xu + yv)} dx dy \\ &= \iint_0^{Nd} \{\dots\} e^{2\pi i(xu + yv)} dx dy. \end{aligned} \quad (10)$$

$FT^a\{I(x)\}$ 의 계수는 도12에 디스플레이된다. 도11과 도12를 비교해보면, 도12에서 보이는 세부적인 것들이 도11에서는 발견되지 않음을 알 수 있다. 또한, FT^a 는 푸리에 공간에서 무한대로 확장되는 반면, FT^d 는 $1/(2d)$ 에서 공지된 나이키스트 한계를 넘어서는 확장될 수 없다.

(불연속적인) 확장된 푸리에 변환 EFT는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} EFT\{\dots\} &= \frac{1}{N} \sum_{m,n=1}^N \{\dots\} \\ &\times e^{-2\pi i[(k + \Delta k)m + (l + \Delta l)n]/N\tau}, \end{aligned} \quad (11)$$

여기서, $-1 \leq \Delta k, \Delta l \leq 1$; $\pi/2 \leq k, l \leq N\pi/2 - 1$ 이다. 역 확장 푸리에 변환은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} EFT^{-1}\{\dots\} &= \frac{1}{N\tau^2} \sum_{k,l=-N\tau/2}^{N\tau/2-1} \{\dots\} \\ &\times e^{2\pi i[(k + \Delta k)m + (l + \Delta l)n]/N\tau}. \end{aligned} \quad (12)$$

새로운 변수들 $\Delta k, \Delta l$ 및 π 는 디스플레이 수 뿐만아니라 푸리에 공간에서의 디스플레이의 변경을 허용한다. $\Delta k, \Delta l=0$ 및 $\pi=1$, $EFT=FT^d$ 이다.

π 의 효과

π 의 효과는 도13으로부터 알 수 있다. $\pi=16$, 및 $\Delta k, \Delta l=0$ 을 이용하면, 도11의 $N=32$ 점들 대신에 푸리에 공간에 디스플레이되 $N\Delta=512$ 개의 점들이 존재한다. 분석 푸리에 변환(도12)에서 보이는 세부적인 것들이 불연속적인 EFT에서도 분명히 나타난다. 그러나, EFT($\pi \geq 1$) 및 FT^d 는 동일한 정보를 포함한다. 분석 푸리에 변환 계수와 확장된 푸리에 변환 계수를 디스플레이 할 시 2가지 차이점들이 아직도 존재한다. 첫 번째는, 나이키스트 한계가 확장된 푸리에 변환에 아직도 적용되고 그리고 어떤 공간 주파수들도 나이키스트 한계를 넘어서는 나타나지 않는다는 것이다. 두 번째는, 제한된 이미지 영역이 푸리에 공간에서 보다 높은 주파수들을 야기하며, 상기 높은 주파수들이 나이키스트 한계에 다시 반영되고 그리고 FT^a 에서 보이는 매우 미세한 디테일(detail)들이 사라지는 것과 같은 차이점을 야기한다.

Δk 의 효과

$EFT\{I_m\}$ 에서 Δk 의 효과가 $\Delta k=0.133$ 및 $\pi=1$ 인 특별한 경우에 대해서 도14에 디스플레이된다. 도11과 비교하면, 2개의 피크들 중 오른쪽에 있는 것은 푸리에 공간의 픽셀(또는 디스플레이 점)과 정확하게 일치한다. 이것이 도11에 보여진 사이드로브들을 사라지게 한다.

푸리에 공간에서 디스플레이 점들에 대한 이러한 이동은 출을 벗어난 광파 홀로그래피에 매우 중요하고, 특히 이미지 진폭을 재구성할 시에 중요하다(대부분의 경우에, 재구성된 위상에서 디스플레이 점에서 떨어져 있는 사이드밴드의 중심에 의해 야기된 웨지(wedge)는 쉽게 보상될 수 있다). 디스플레이 점에서 떨어져 있는 사이드밴드 중심의 효과는 재구성된 진폭에 잡음을 야기한다는 것이다.

푸리에 공간에서 재구성된 디스플레이 점의 중심에서 실제로 떨어져 있는 사이드밴드의 중심 효과를 증명할 수 있다. 이것을 증명하기 위해서, 사이드밴드가 푸리에 공간의 디스플레이 점 (k, l) 상에 정확히 위치하도록 컴퓨터(512 X 512 의 이미지 크기)로 빈 홀로그램을 발생시킨다. 이 경우에, 재구성된 진폭은 평탄하고 그리고 실제로 0%의 평균 표준 이탈을 보여준다. 이 생성 시 약간의 변경을 하여, 즉 샘플링 비율 s 를 감소시킴으로서, 사이드밴드의 중심이 디스플레이 점들 (k, l) 과 $(k+1, l+1)$ 사이에 위치하게 한다. 평균 표준 이탈이 다시 계산되어, 사이드밴드의 중심이 디스플레이 점 $(k+1, l+1)$ 에 위치하게 될 때까지 계속해서 샘플링 비율을 감소시킨다. 이 시뮬레이션 결과가 도15에 디스플레이된다. 최악의 경우에, 사이드밴드의 중심이 $(k+1/2, l+1/2)$ 에서 발견될 시, 재구성된 진폭의 평균 표준 이탈은 10%에 달한다.

전술된 관측에 근거하여, 아래 재구성 절차가 다음과 같이 이룰 수 있다.

(1) (가능한 경우)오브젝트 기여를 보여주지 않는 영역의 홀로그램을 선택한다.

(2) 이 영역(또는 모든 홀로그램)에 하닝 윈도우(Hanning window)를 적용한다.

(3) FT^d 를 실행하고 그리고 사이드밴드의 정확한 위치 정보를 끌어낸다. 이것이 확장된 푸리에 알고리즘에 대해 Δk 및 Δl 을 정의한다.

(4) Δk 및 Δl 에 대한 정보를 이용하여 EFT를 적용한다. $\pi=1$ 을 이용한다.

(5) 완벽하게 중심에 위치하는 사이드밴드를 격리시킨다.

(6) 역 FT^d 를 실행한다.

(7) 진폭 및 위상을 끌어낸다.

예. 하닝 윈도우를 적용하고 그리고 FT^d 를 실행한다. 사이드밴드의 위치는 Proc. 10th Pfefferkorn Conf. Scanning Microsc. Suppl. 6(1992) 347 에서 W.J. de Ruijter 와 그밖의 사람들이 이용한 값 $\Delta k=0.62$ 및 $\Delta l=0.31$ 을 이용하면 (134.62, 172.31)이다. 이들 데이터를 $\pi=1$ 과 함께 이용하여 홀로그램의 EFT를 실행한다. 사이드밴드는 디스플레이 점상에 중심이 위치하고 그리고 결점들은 재구성된 진폭에서 줄어든다.

본 발명의 실제 응용

과학기술 분야 내에서 가치를 갖게되는 본 발명의 실제 적용대상은 컴퓨터 보조 측정을 위한 홀로그래피 간섭이다. 더욱이, 본 발명은 연회 또는 훈련을 목적으로, 또는 그런 종류의 다른 것들을 위해 이용되는 홀로그래피 텔레비전 또는 영화("홀로비전")와 연계될 시 유용하다. 광파 홀로그래피 현미경 및 전자 홀로그래피 현미경에 대한 3차원 나노영상화(nanovisualization) 및 측정이 중요한 과학 응용분야에서 기대된다. 실제로 본 발명에 대한 많은 용도들이 존재하는데, 이들 모두가 여기서 열거될 필요는 없다.

발명의 이점

본 발명의 실시예를 나타내는 디지털 방식의 홀로그램 시스템은 비용면에서 효율적이고 그리고 적어도 아래 이유들에 대한 이점이 있다. 고해상도 CCD 그리고 간섭 패턴의 밀도를 CCD가 기록할 수 있는 밀도로 줄이는 광학 기술의 결합이, 간섭계를 위해 개발된 그리고 전자 홀로그래피를 위해 Dr. Voelkl에 의해 개발된 푸리에 변환 기술과 결합되어, 전자 기록 및 홀로그램을 재생하게 해준다.

여기에 기술된 본 발명의 발표된 실시예들 모두는 과도한 실험을 하지 않고도 실현되어 실행될 수 있다. 본 발명을 실행하는 발명자들이 생각하는 최상의 모드가 전술됐음에도 불구하고, 본 발명의 실행은 그것으로 제한되는 것은 아니다. 본 발명에 대해 여러가지 부가물, 수정 및 특성들의 재배열은 명백하게 본 발명의 기본 개념의 정신과 범위로부터 벗어나지 않고도 실현될 수 있다. 따라서, 당업자들은 본 발명이 여기에 특정하게 기술된 것으로서 보다는 다른 방법으로도 실행될 수도 있음을 이해할 것이다.

예를 들면, 개별적인 부품들은 발표된 형태들로 형성되거나, 또는 발표된 구조로 조립될 필요가 없고, 실제로 소정 형태와 구조로 조립될 수 있다. 더욱이, 개별적인 부품들은 발표된 재료들로 조립될 필요가 없고, 실제로 적당한 재료들로 제조될 수 있다. 더 나아가서, 여기에 기술된 기록 장비가 물리적으로 개별적인 모듈일지라도, 기록 장비가 관련 장비에 통합될 것은 명백하다. 게다가, 각각의 발표된 실시예들의 발표된 소자들 및 특성들 모두는 그러한 소자들 또는 특성들이 상호 배타적인 실시예를 제외하고는 발표된 모든 다른 실시예의 발표된 소자들 및 특성들과 결합되거나 또는 대체될 수 있다.

부가된 청구의 범위는 모든 그러한 부가물, 수정 및 재배열을 포함한다. 본 발명의 편리한 실시예들은 부가된 종속항들에 의해 차별화된다.

참고문헌

1. D.Gabor, Proc.Roy.Soc.London Ser. AA197,459(1949).
2. E.Leith 및 J.Upatnieks, J.Opt.Soc.Am.52, 1123(1962).
3. E.Leith 및 J.Upatnieks, J.Opt.Soc.Am.53, 1377(1963).
4. J.B.Develis 및 G.O.Reynolds, 홀로그래피의 이론 및 응용, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1967.
5. L.O.Heflinger, R.F.Wuerker, 및 R.E.Brooks, J.Appl.Phys. 37, 642(1966).
6. F.C.Jahoda 및 R.E.Jeffries, 및 G.A.Sawyer, Appl. Opt. 6, 1407(1967);
7. F.C.Jahoda 및 R.E.Siemon, 홀로그래피 간섭계 해설서, LA-5058-MS Informal Report UC-37, Los Alamos Scientific Laboratory, Los Alamos, 뉴멕시코, (1972).
8. Mkujawinski, in Interferogram Analysis: (D.W.Robinson 및 G.T.Reid에 의해 편집된) 디지털 프린지 패턴 측정 기술, IOP 출판사, 브리스톨, 일랜드, 1993.
9. K.Creath 및 T.Kreis, in Holography Interferometry: 원리와 방법, (K.Rastogi에 의해 편집), Springer-Verlag, 뉴욕, 뉴욕, 1994
10. E.Voelkl, L.F. Allard, 및 B.Frost, J.Microscopy 180 pt. 1, 1995년 10월, 페이지 39-50.
11. E.Voelkl, 및 L.F. Allard, A.Datye, B.Frost, Ultramicroscopy 58, (1995), 페이지 97-103.
12. E.Voelkl, alc L.F. Allard, ICEM-13(전자 현미경 사용법에 대한 13차 국제회의), 1994년 7월 17-22, 프랑스, 파리, 회보, 페이지 287.
13. 전기 엔지니어링 핸드북, CRC 출판사, (Richard C.Dorf 과 그밖의 편집자들, 1993).

14. 광학 핸드북, 볼륨 I-II, 2판, McGraw Hill Inc., (Michael Bass와 그밖의 편집자들, 1995).

(57) 청구의 범위

청구항 1

레이저; 상기 레이저에 광학적으로 연결된 빔스프리터; 상기 빔스프리터에 광학적으로 연결된 기준 빔 반사경; 상기 빔스프리터에 광학적으로 연결된 오브젝트, 상기 기준 빔 반사경 및 상기 오브젝트에 광학적으로 연결된 포커싱 렌즈; 및 상기 포커싱 렌즈에 광학적으로 연결된 디지털 기록기를 구비하는 장치로서,

기준 빔은 법선이 아닌 각도로 놓이는 상기 기준 빔 반사경에 입사하고, 그리고 상기 기준 빔 및 오브젝트 빔은 이미지를 형성하기 위해 상기 포커싱 렌즈에 의해 상기 디지털 기록기의 초점 평면에 포커싱되는 것을 특징으로 하는 장치.

청구항 2

제 1 항에 있어서,

상기 디지털 기록기는 CCD 카메라인 것을 특징으로 하는 장치.

청구항 3

제 1 항에 있어서,

상기 레이저와 상기 빔 스프리터 사이에 광학적으로 연결된 빔 익스팬더/공간 필터를 더 구비하는 것을 특징으로 하는 장치.

청구항 4

제1항의 장치를 이용하는 컴퓨터 자동 측정 방법.

청구항 5

제1항의 장치로 만들어진 이미지.

청구항 6

레이저 빔을 기준 빔 및 오브젝트 빔으로 분할하는 단계;

기준 빔 반사경으로부터 상기 기준 빔을 법선이 아닌 각도로 반사시키는 단계;

오브젝트로부터 상기 오브젝트 빔을 반사하는 단계;

이미지를 형성하기 위해서 상기 기준 빔과 상기 오브젝트 빔을 디지털 기록기의 초점 평면에 포커싱하는 단계; 그리고

상기 이미지를 디지털 방식으로 기록하는 단계를 구비하는 방법.

청구항 7

제 6 항에 있어서,

상기 디지털 방식으로 기록하는 단계는 상기 빔을 CCD 카메라로 검출하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 8

제 6 항에 있어서,

상기 이미지를 디지털 데이터로 저장하는 단계를 더 구비하는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 9

제 6 항에 있어서,

상기 이미지를 재생하는 단계를 더 구비하는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 10

제 6 항에 있어서,

상기 디지털 데이터를 전송하는 단계를 더 구비하는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 11

제 6 항의 방법을 실행하기 위한 장치.

청구항 12

레이저 빔을 기준 빔과 오브젝트 빔으로 분할하는 단계;

기준 빔 반사경으로부터 상기 기준 빔을 법선이 아닌 각도로 반사하는 단계;

오브젝트로부터 상기 오브젝트 빔을 반사하는 단계;

상기 이미지를 형성하기 위해 상기 기준 빔과 상기 오브젝트 빔을 디지털 기록기의 초점 평면에 포커싱하는 단계; 그리고

상기 이미지를 디지털 방식으로 기록하는 단계를 구비하는 프로세스에 의해 준비된 이미지.

청구항 13

제 12 항에 있어서,

상기 이미지는 푸리에 변환을 이용하여 생성되는 것을 특징으로 하는 이미지.

청구항 14

i) 디지털 기록기;

ii) 광원;

iii) 빔스프리터;

iv) 기준 빔 반사경;

v) 상기 디지털 기록기에 접속된 디지털 메모리를 제공하는 단계;

상기 오브젝트를 상기 광원으로부터 나오는 광자로 조명하는 단계;

상기 오브젝트로부터의 반사광을 상기 디지털 기록기까지 전송하는 단계;

상기 광원으로부터 나오는 광자가 상기 기준 빔 반사경에 법선이 아닌 각도로 입사되게 조명하는 단계;

상기 오브젝트와 상기 기준 빔 반사경으로부터의 반사광을 상기 디지털 기록기의 초점 평면에 포커싱하는 단계;

이미지를 형성하기 위해서 상기 반사광을 상기 디지털 기록기로 기록하는 단계;

상기 디지털 이미지를 상기 디지털 메모리로 저장하는 단계; 그리고

결과 세트(set)를 얻기위해 푸리에 변환에 따라 상기 디지털 이미지를 변환하는 단계를 구비하는 방법.

청구항 15

제 14 항에 있어서,

상기 결과 세트를 전송 및 수신하는 단계를 더 구비하는 것을 특징으로 하는 방법.

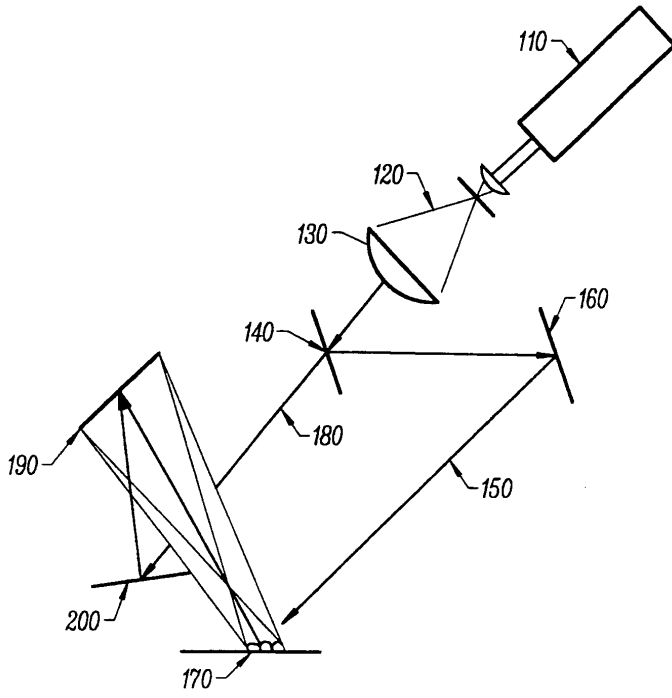
청구항 16

제 15 항에 있어서,

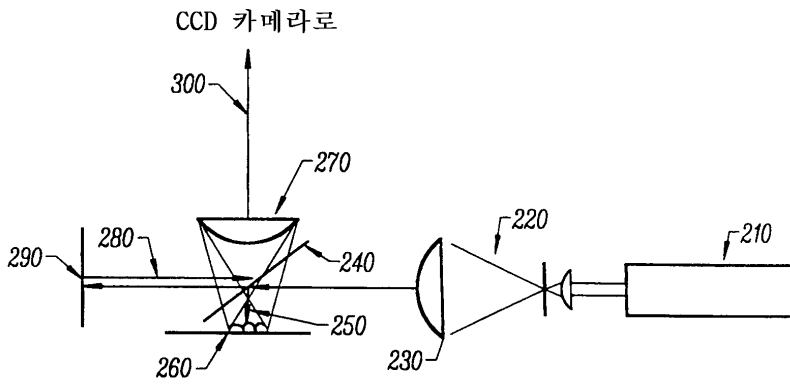
상기 디지털 이미지를 재생하는 단계를 더 구비하는 것을 특징으로 하는 방법.

도면

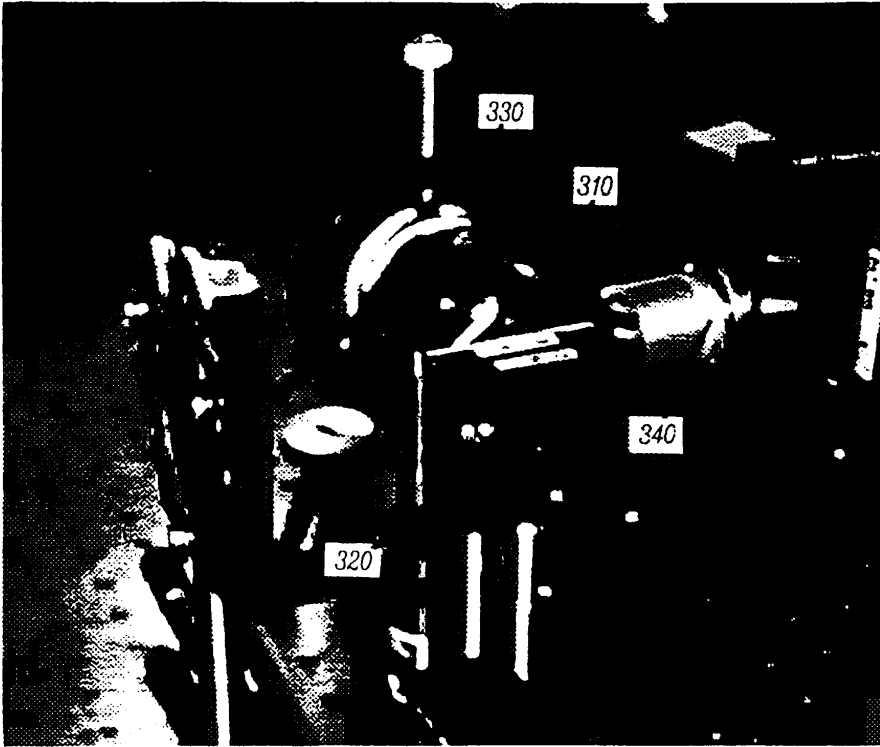
도면1



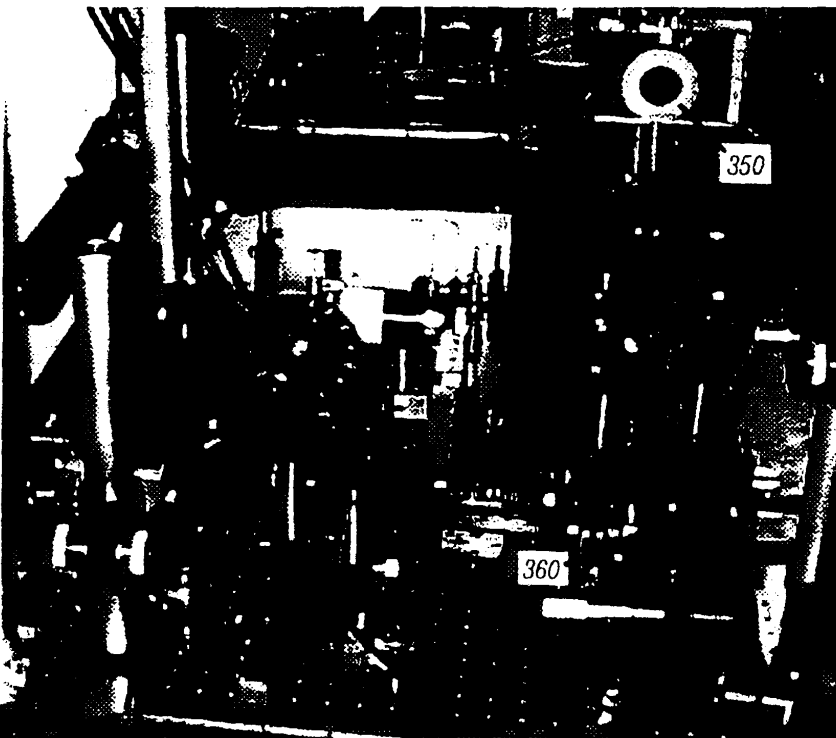
도면2



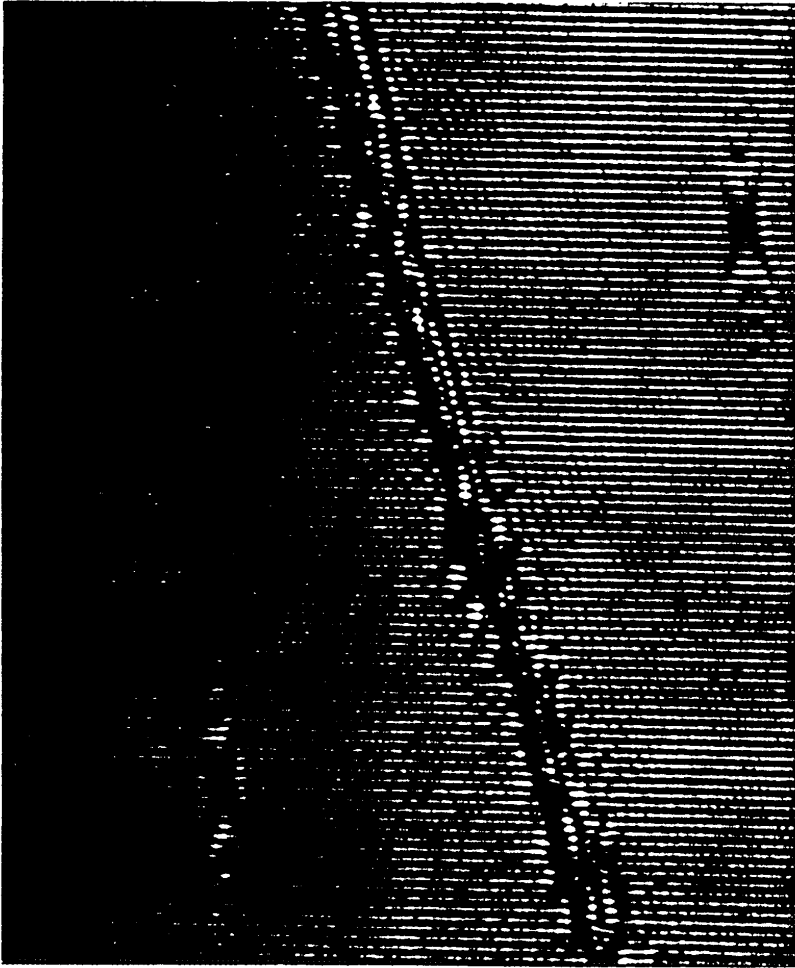
도면3a



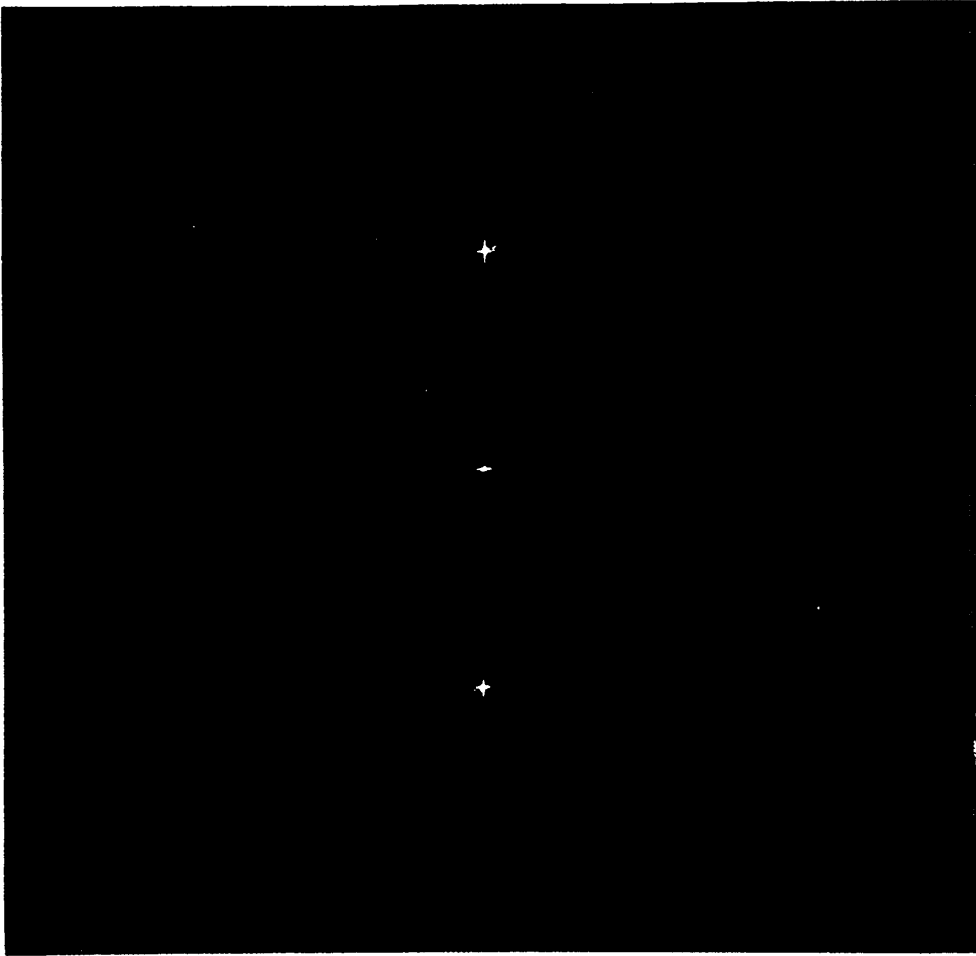
도면3b



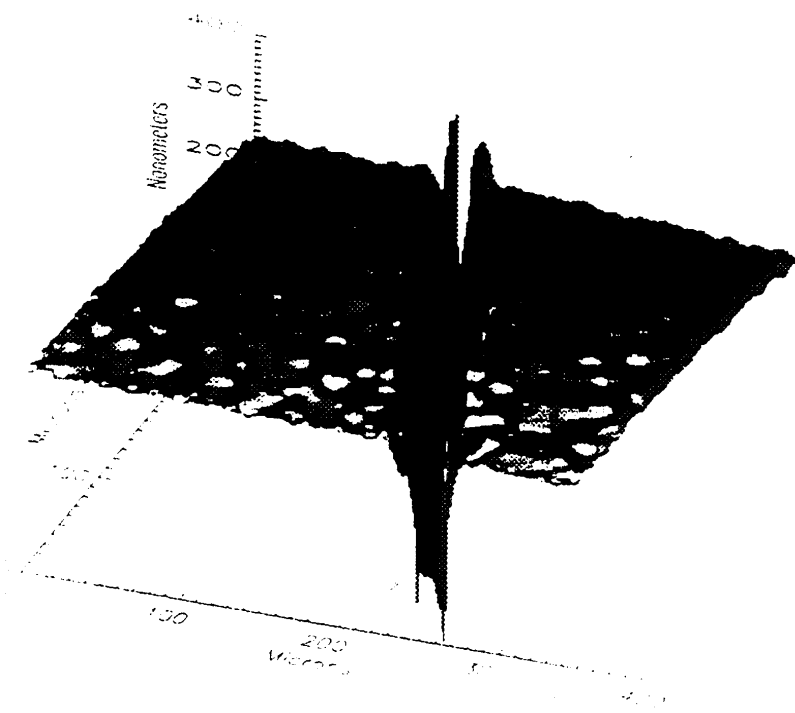
도면4



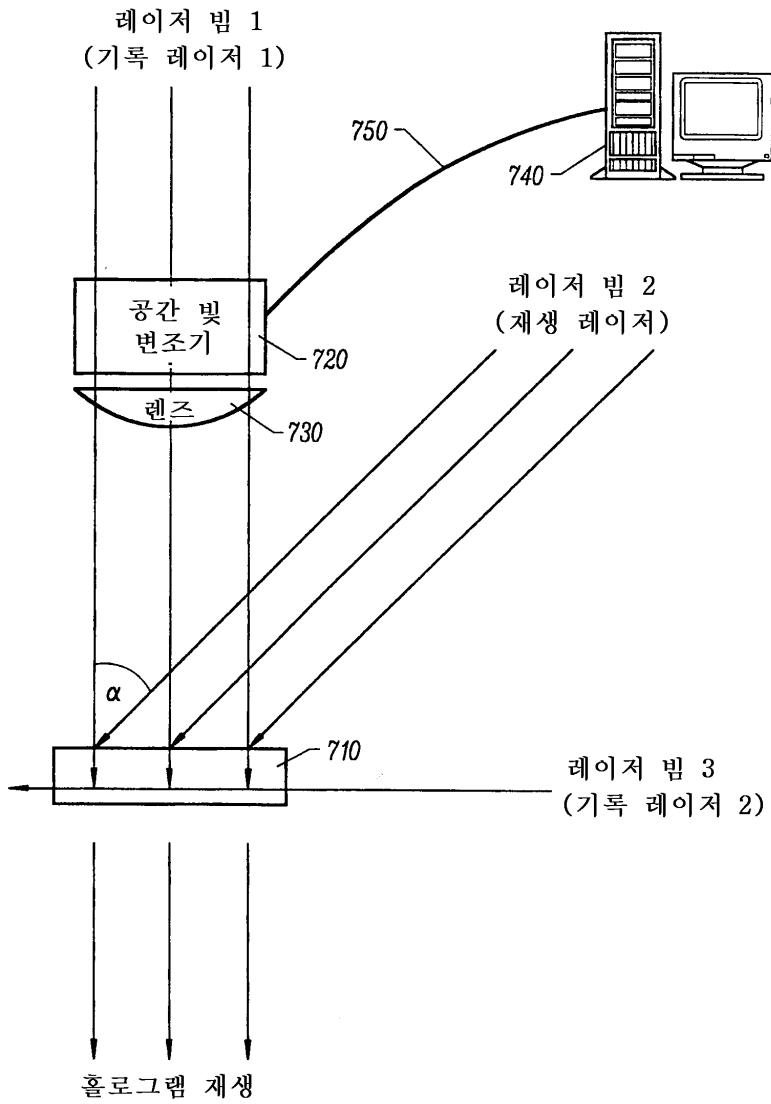
도면5



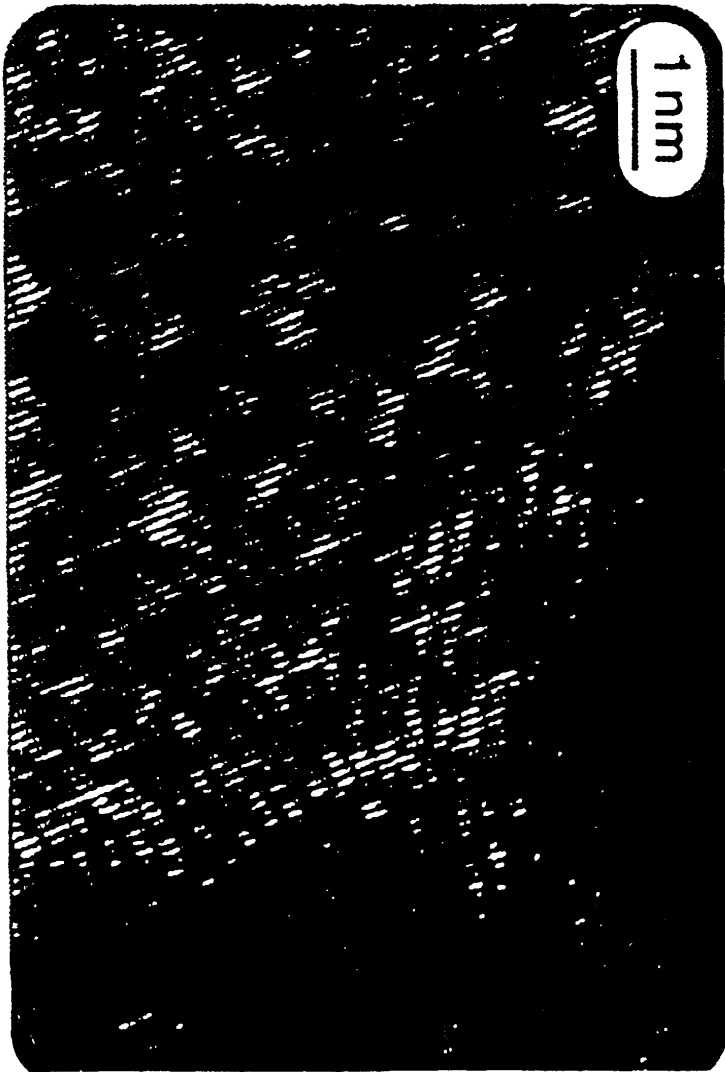
도면6



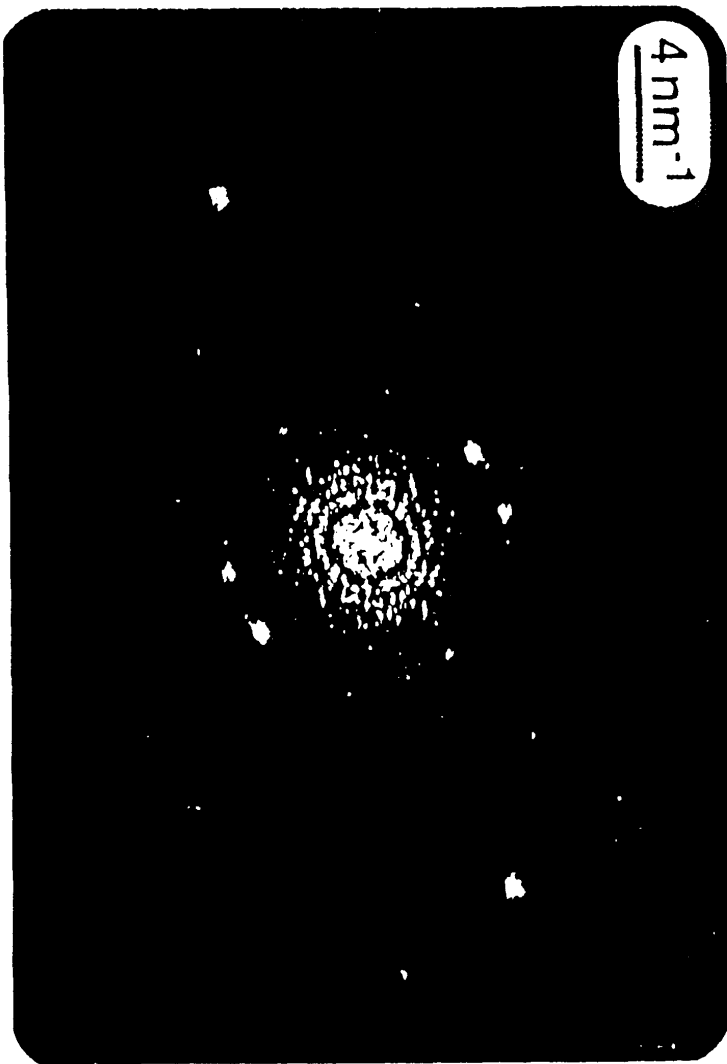
도면7



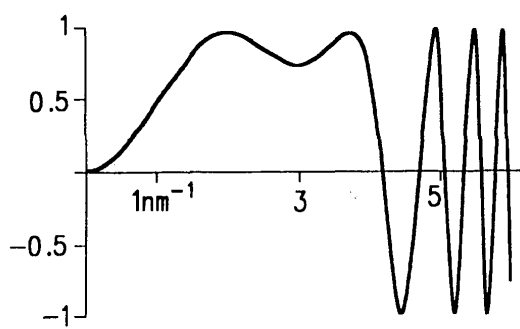
도면8



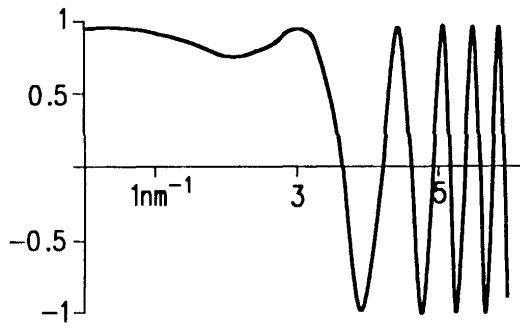
도면9



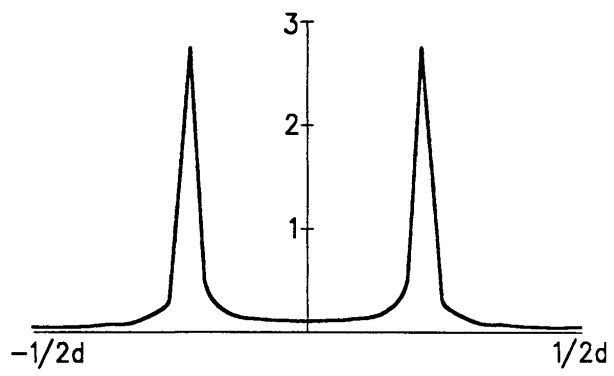
도면 10a



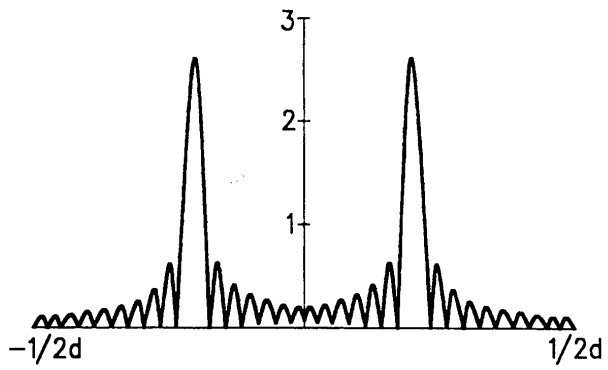
도면 10b



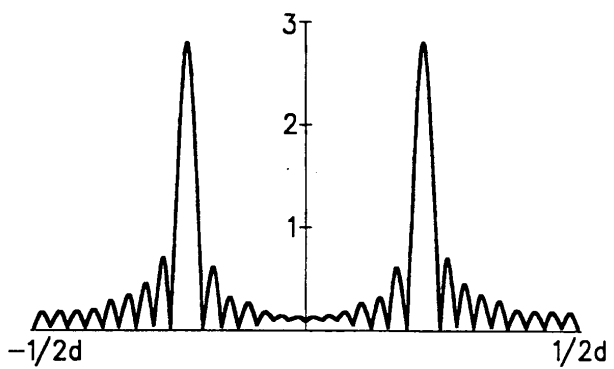
도면 11



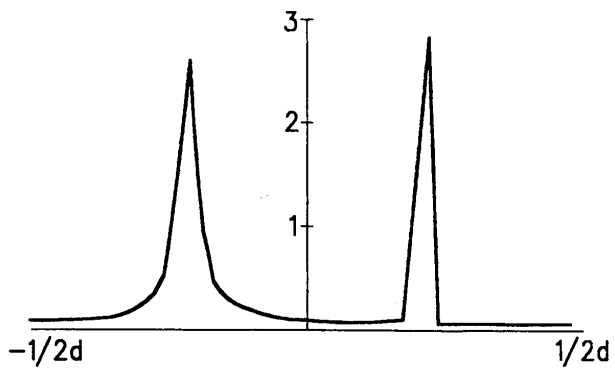
도면 12



도면 13



도면14



도면15

