

1. 머리말

3차원 디스플레이 기술은 관측자에게 기존의 평면 이미지가 아니라 실재감 있는 3차원 입체로서 영상을 느낄 수 있도록 표시하는 기술을 말한다. 3차원 영상을 디스플레이 하여 자연에서 보는 바와 같은 자연스러운 풍광, 사물을 표시하는 기술은 오랜 인류의 꿈으로서, 100 여 년 전부터 여러 선각자들에 의하여 현실적인 연구가 도모되기 시작했다. 이러한 노력의 결실로서 현재 거리의 소형 광고 매체, 시각 예술의 수단, 유원지에서의 실감형 극장 등에서 제한적으로 3차원 디스플레이 기술이 응용되고 있다. 그러나 최근 이러한 광고 매체 등에의 제한적인 응용을 넘어, 보다 본격적으로 인간의 감성에 호소하는 중심적 영상 전달 수단으로서 3차원 입체 영상에 대한 기대가 높아지

3차원 입체 정보통신 시스템의 중심 기반 기술로서 3차원 입체 영상 디스플레이 기술의 중요성이 날로 강조되고 있으며 그 일환으로서 현재 3D TV, 3D monitor 등에 대한 연구가 여러 선진국에서 경쟁적으로 활발히 진행되고 있다. 최근 들어 국내에서도 이러한 중요성을 인지하고 3차원 입체 디스플레이에 대한 연구가 여러 산업계, 학계를 중심으로 시작되고 있으나 아직 그 기술의 발전정도가 충분치 못하고 상용화, 산업화에 이르는 아직 요원한 실정이다. 이러한 국내외의 상황을 살펴 볼 때, 다가오는 차세대 멀티미디어 정보통신 시대에 정보통신 강국으로서의 선도적 위치를 선점하고 세계시장에서 경제적, 문화적으로 주도적 영향력을 행사하기 위하여 경쟁력 있는 3차원 디스플레이에 대한 적극적이고 효율적인 연구가 무엇보다 필요하다고 하겠다.

특집 「디스플레이」

3차원 디스플레이 기술 개발 동향

이병호*

고 그 필요성이 강조되고 있다. 최근의 초고속 정보통신망을 근간으로 한 정보고속화도로(information super highway)는 각 개인에게 전달할 수 있는 정보의 양을 대폭 늘려주어, 우리가 일상적으로 보는 자연의 풍광 및 사물에 보다 근접한 실재감 있고 자연스러운 영상 정보를 받고 싶어 하는 인간의 욕구를 충족시켜 줄 수 있는 기술적 기반을 마련해 주었다. 따라서 1900년 대 초반의 전화를 이용해 음성 정보를 처리하는 청각 신호의 통신 서비스, 현재의 디지털 단말기를 이용해 음성, 영상 정보를 처리하여 '보고 듣는' 시청각 신호의 통신 서비스를 넘어, 곧 다가올 미래에는 궁극적으로 음성, 영상, 3차원 정보를 통합하여 '시간과 공간의 제약'을 넘어 실감 있고 입체적으로 보고 느끼고 즐기는' 초공간형 실감 3차원 입체 정보통신 서비스가 등장하여 차세대 멀티미디어 서비스의 중심축을 이루리라는 것을 쉽게 예상할 수 있다. 이와 같은 실감형

2. 3차원 디스플레이 기술의 분류 및 개관

현재까지 개발되었거나 연구되고 있는 3차원 디스플레이 기술은 기구적인 측면에서 크게, 관찰자가 특수한 안경을 착용해야 하는 안경식(stereoscopic)과, 특수한 안경을 착용하지 않고서도 3차원 영상을 관찰할 수 있는 무안경식(autostereoscopic)의 두 범주로 나뉘어 진다¹⁾. 안경식 3차원 디스플레이는 관측자의 왼쪽 눈과 오른쪽 눈에 시차가 있는 영상을 제공하여 관측자의 뇌로 하여금 깊이감을 느끼게 하는 방식으로, 좌안 영상과 우안 영상을 분리하는 방법에 따라 편광 안경 방식, 액정 셔터 방식 등이 있다. 안경식 디스플레이 기술은 3차원 디스플레이 기술에 있어서 가장 전통적인 방식으로 기술적으로 이미 완성 단계에 있고, 3차원 영화관, 게임기 등 상업적 용도로 현재 가장 널리 사용되고 있는 방식이다. 이 방식은 관측자에게

* 서울대학교 전기공학부

정확한 깊이감을 전달할 수 있다는 장점이 있어 3차원 CAD, HMD(head-mounted display) 등으로 지속적인 연구가 진행되고 있다^[2]. 그러나 안경을 써야하는 불편함과 함께, 낮은 광효율(광효율 30% 이하), 깜빡임 현상이나 관찰자 눈의 피로, 두통 등의 문제점을 가지고 있어 차세대 멀티미디어 디스플레이로 적용되기에는 한계가 있다.

안경식의 한계점을 극복하기 위하여 연구되고 있는 무안경식 3차원 디스플레이에는, 관측자의 시차를 이용하는 다시점 양안 시차 디스플레이 방식과, 공간상에 실제로 3차원 이미지를 형성하는 체적형 디스플레이 방식, 3차원 물체의 파면을 그대로 재현하는 홀로그래피 방식 등이 있다. 다시점 디스플레이 방식은 디스플레이 패널 앞에 렌티큘러 렌즈(lenticular lens)나 시차 장벽(parallax barrier) 등을 설치하여 안경을 사용하지 않고 좌안 영상과 우안 영상을 분리하여 일정한 위치에 있는 관측자로 하여금 깊이감을 느끼게 하는 방식으로서, 안경식과 유사한 점이 많아 기술의 실현성이 높고 상용화가 쉽다는 장점이 있다. 이미 Phillips사, DTI사 등에서 컴퓨터용 모니터와 TV 제품을 출시하고 있고, 최근 일본 Sanyo사에서는 시차 장벽 방식 2D/3D 변환 디스플레이를 사용한 핸드폰을 출시한 바 있다. 그러나 이 방식은 관찰 시점이 증가할수록 영상의 해상도가 떨어지고, 수직방향의 시차는 가질 수 없다는 단점이 있다. 이러한 문제점들을 극복하기 위하여 다시점 기술, 시점 추적 기술, 렌즈 어레이(array)를 이용하여 수평방향과 수직방향 모두 시차를 갖게 하는 집적 영상(integral imaging) 기술 등이 널리 연구되고 있다. 체적형 디스플레이 방식은 가변 초점 거울이나 회전 스크린 등을 통하여 공간상에 직접 3차원 입체 영상을 형성하는 방법으로, 시점의 제한이 없이 어느 위치에서나 3차원 입체 영상을 관측할 수 있다는 장점이 있지만, 영상을 생성하기 위해 기계적인 움직임이 필요하다는 단점이 있다^[3]. 최근에는 두 종류의 레이저와 광물질 큐빅을 이용하여 큐빅 안에 3차원 영상을 만드는 기술이 개발된 바 있다^[4]. 홀로그래피 방식은 빛의 간섭이나 전자식 기법으로 물체에서 반사되는 빛의 파면을 저장하거나 가상적으로 만들어내고, 이를 재생하는 방법으로서, 가장 완벽한 3차원 영상을 구현할 수 있다. 그러나 이 기술은 레이저 등 고가의 광원을 이용해야 하고, 동영상 구현이 어렵고, 표현 할 수 있는 입체 영상의 크기와 색상에 제한이 있어 가까운 장래에 동영상

상 디스플레이로 상용화되기 힘들 것으로 예상된다. 이상과 같은 다양한 3차원 디스플레이 기술을 정리하면 표 1과 같다.

3. 각 3차원 디스플레이 기술들의 소개 및 개발 추세

3.1 다시점 양안 시차 입체 영상 디스플레이

3.1.1 다시점 렌티큘러 방식

렌티큘러 방식은 시차 장벽 방식과 함께 양안시차를 이용한 무안경식 3차원 디스플레이 기술의 대표주자이다. 기본적인 렌티큘러 방식의 원리는 그림 1과 같이 디스플레이 소자의 화소들을 전면에 배치된 렌티큘러 렌즈를 이용하여 좌안과 우안 영상으로 분리하여 사용자의 눈에 보이도록 하는 것이다. 그러나 이러한 기본적인 2안식 렌티큘러 방식은 시점의 개수가 하나로 제한되어 있고 사용자의 눈이 하나의 위치만을 응시함으로써 생기는 피로감으로 인하여 오랜 시간 동안의 관찰이 불가능하였다.

최근에는 이를 해결하기 위하여 표시되는 이미지를 더욱 세밀한 화소 단위로 배열하고 그에 맞는 렌티큘러 렌즈를 부착한 다시점 렌티큘러 방식이 제안되었다^[5,6]. 그림 2는 Phillips사에서 최근 제안한 7개의 시점을 갖는 3차원 액정 디스플레이의 개념도이다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 각 적, 녹, 청(RGB) 화소들을 부화소들로 분리하여 각 부화소들마다 다른 영상을 표시하도록 하고 전면에 놓인 렌티큘러 렌즈를 일정한 각도(9.46°)로 경사지게 배열함으로써 각 시점간의 간섭현상이 일어나지 않도록 하였다. 그러나 7개의 시점 역시 자연스러운 입체 영상을 관찰하기에는 부족하고 디스플레이 소자의 해상도가 1/3 정도로 감소한다. 결국 다시점 렌티큘러 방식은 렌티큘러 렌즈의 광학적 패러미터의 최적화와 고해상도 디스플레이 소자의 개발에 그 발전도가 좌우된다고 할 수 있다.

또한, 이 방식은 좌안과 우안 영상을 렌티큘러 렌즈뿐만 아니라 시차 장벽이나 홀로그래픽 소자(holographic optical element: HOE) 등을 이용하여 분리하는 방식으로도 응용되고 있다. 그림 3에 다수의 프로젝터와 홀로그래픽 스크린을 이용하여 구현한 다시점 3차원 디스플레이의 구조도가 표시되어 있다^[9].

3차원 디스플레이 기술 개발 동향

3.1.2 이동 셔터 방식

이동 셔터 방식은 디스플레이 소자의 전면에 기계적 또는 전기적으로 개폐되는 셔터를 설치하여 사용자가 특정 위치에서만 영상을 관찰할 수 있도록 하고, 셔터의 위치와 디스플레이 소자에 표시되는 화상을 동기시켜 바꾸어 줌

으로써 사용자가 위치에 따라 다른 영상을 관찰하도록 하는 원리이다. 그림 4에 액정 셔터를 사용하여 구현된 3차원 디스플레이의 구조도가 표시되어 있다. 국내의 KIST에서는 과거에 480Hz의 수직 주파수로 구동되는 특수 CRT와 시공분할을 통해 16개의 시점을 갖는 3차원 디스플레

표 1. 3차원 디스플레이 기술의 분류

대분류	중분류	소분류	비 고
안경식(Stereoscopic)		편광안경 방식	다인 시청 가능, 시분할 방식
		액정셔터 방식	
무안경식 (Autostereoscopic)	다시점 양안시차 디스플레이 방식	렌티큘러 렌즈 방식 (Lenticular lens)	직시형, 투사형
		시차 장벽 방식 (Parallax barrier)	Barrier strips
		HOE 방식(Holographic optical element)	홀로그래픽 스크린 이용
		이동 셔터 방식	주로 CRT 이용
		위치 추적 방식	일인 시청 가능
		집적영상 방식 (Integral imaging)	수평, 수직 시차 제공 (이 기술은 체적형으로 분류될 수도 있음)
	체적형 디스플레이 방식	가변초점거울 방식 (Varifocal-mirror display)	거울의 진동
		회전 스크린 방식 (Spinning screen display)	기계적 움직임 필요
		교차빔 방식 (Crossed-beam display)	높은 가격
	홀로그래피 방식	무지개(Rainbow) 홀로그램, 리프먼(Lippmann) 홀로그램, 멀티플렉스 홀로그램 등	많은 종류가 있음 동화상 표시가 어려움
홀로그래픽 비디오 (전자 홀로그래피: Electro-holography)		동화상 표시가 가능하나 실시간으로 동영상 정보를 수신하여 디스플레이 하기는 어려움	

평면 디스플레이

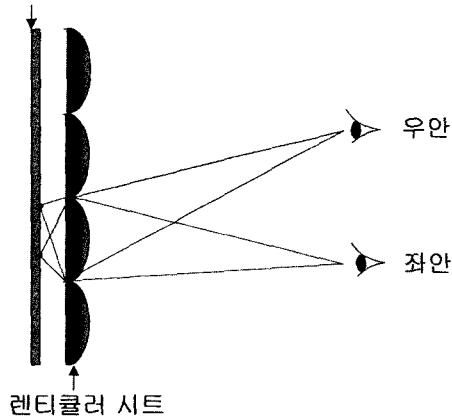


그림 1. 2안식 렌티큘러 방식의 원리

디스플레이 픽셀

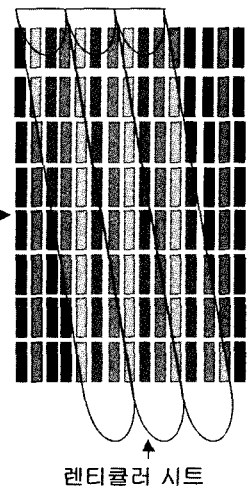


그림 2. 다시점 렌티큘러 방식의 원리

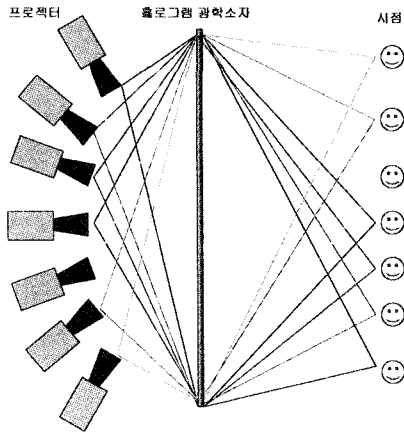


그림 3. 홀로그래픽 스크린을 이용한 다시점 3차원 디스플레이

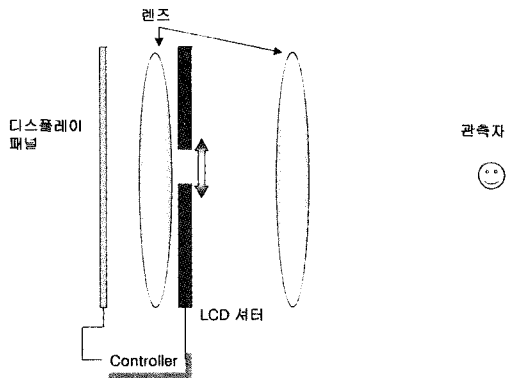


그림 4. 액정 셔터를 사용하는 3차원 디스플레이

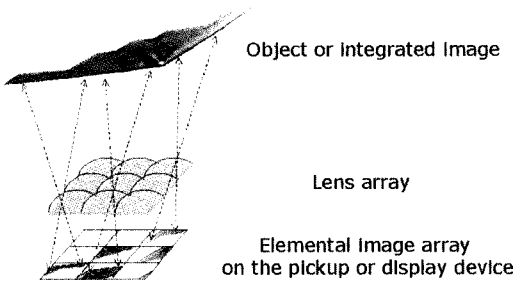


그림 5. 집적영상 방식 3차원 디스플레이의 원리

이를 구현하였다. 해외에서는 영국에 위치한 캠브리지 (Cambridge) 대학이 미국의 Infinity사와 공동으로 24시 점을 갖는 시스템을 개발하였으며 최근 50인치급 3차원 디스플레이 시스템을 선보였다. 그러나 이 기술은 다수의 CRT를 사용하여 구현되었기 때문에 시스템의 부피가 크다는 단점을 갖고 있다^[10].

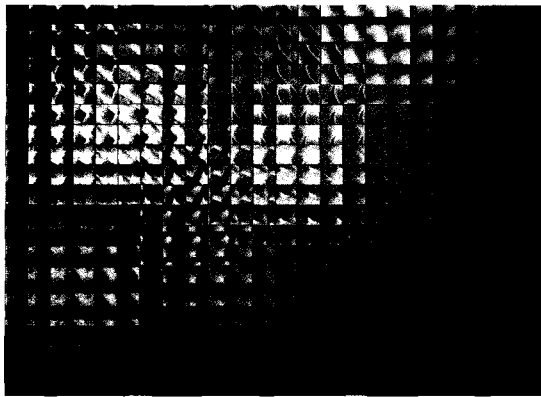
3.1.3 위치 추적 방식

사용자의 위치, 또는 시선의 방향을 시스템에 부착된 두 부추적(head tracking)장치를 이용하여 인지하여 그에 따라 다른 영상을 표시해 줌으로써 입체감을 느끼도록 하는 방식이다. 이러한 방식은 관찰자의 수가 1인으로 제한되어 그 실용성이 떨어진다 할 수 있다. 이 기술은 New

York 대학, MIT 등에서 연구되고 있다^[11-13].

3.1.4 집적영상 방식(integral imaging)

이 방식은 2차원 기초 영상 집합으로부터 특정 깊이를 갖는 3차원 영상을 일정한 체적 내에서 표현하는 방식으로 시야각 안에서 시점의 이동이 자유롭고 완전 패럴랙스를 구현하는 장점을 갖는다^[14-19]. 따라서 이는 다른 다시점 양안시차 방식들과 차별화 되며 분류에 따라서는 이를 체적형 디스플레이 방식으로 취급할 수도 있다. 그 기본적인 원리는 매우 간단한데, 그림 5에서와 같이 렌즈 어레이를 이용하여 3차원 물체의 여러 방향에서 바라본 서로 다른 영상들을 기초 영상의 형태로 저장 또는 전송한 후 이를 다시 렌즈 어레이를 통해 원래의 광파를 재생하는 방식이다. 이 개념은 원래 1908년에 Lippmann에 의해 처음 제안되었으나, 그 당시에는 저장, 재생 소자로 사진 건판이나 필름을 사용하였다. 따라서 실시간 동영상의 구현이 불가능하여 그다지 주목받지 못하다가 최근 컴퓨터 그래픽을 통한 기초 영상 생성이나 CCD 및 LCD 등의 능동 소자를 이용한 저장 및 재생이 가능해지면서 활발히 연구되고 있다. 특히 이 방식은 2차원 디스플레이와 렌즈 어레이만을 이용하는 간단한 구조이므로, 고해상도 CCD를 통한 기초 영상의 실시간 전송이 가능해지면 입체 TV등에의 응용에 적합한 방식이라 예상된다. 하지만 pseudoscopic 문제나 시야각과 깊이감의 제한 등을 해결하기 위한 보다 많은 연구가 필요하다. 그림 6은 컴퓨터 그래픽으로 제작된 기초영상과 이



(a) 기초영상



(b) 집적영상

그림 6. 기초영상과 집적영상의 예

를 통해 재생된 집적영상의 예를 보여준다.

3.2 체적형(volumetric) 입체 영상 디스플레이

입체감을 주는 요소로 양안시차만을 이용하는 스테레오 스코픽 디스플레이 방식과는 달리 실제로 3차원 공간에 입체상을 형성하므로 여러 시각 요소들에 의해 보다 자연스러운 입체감을 느낄 수 있는 기술이다. 이 방식은 일반적으로 관찰 가능한 시역이 넓어서 여러명의 관찰자가 다양한 방향에서 입체 영상을 볼 수 있으나 임의의 영상 체적에 대한 가려짐 현상(occlusion)이 생기지 않는 단점이 있다.^[20-25]

3.2.1 가변초점거울 방식(varifocal-mirror display)

가변초점거울 3차원 디스플레이는 광량을 변화시키는 진동 반사막을 이용해 CRT와 같은 2차원 디스플레이로부터의 영상을 반사시켜 체적에 따른 서로 다른 깊이 평면을 채우는 방식으로 기본적인 구조는 그림 7과 같다. 이 시스템에서는 반사 거울을 전기 신호로 진동시키고 이와 동기한 영상을 CRT 디스플레이에 표시함으로써 거울에서 반사한 상을 입체 영상으로 관찰할 수 있다. 거울로는 유연성이 있는 폴리에스테르 필름 등이 사용되며 거울의 진동은 눈의 잔상 특성을 이용해야 하므로 약 30~60Hz가 이용되고 있다. 이 방식은 거울의 진동 진폭의 100배 이상의 깊이감이 얻어지지만 진동 거울의 곡면 변화에 의해 상의 변형이나 배율이 변화하는 문제점이 있다. 또한 높은 주파수로 진동하는 정교한 가변초점 광학계가 필요하다는 것도 단점이다.

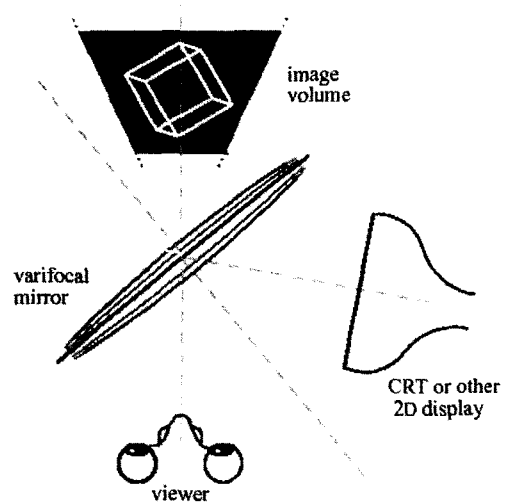


그림 7. 가변초점거울 방식 3차원 디스플레이

3.2.2 회전스크린 방식(spinning screen or spinning element display)

이 방식에서는 디스플레이 스크린 자체가 빠른 속도로 회전해 3차원 부피 전체를 표시한다. 즉 스크린이 충분히 빠른 속도로 회전하게 되면 인간의 눈은 이를 알아차릴 수 없는데, 스크린 위의 특정 픽셀들이 스크린의 회전과 동기되어 반복적으로 충분히 밝게 켜지면 이는 공간상에 형성된 점광처럼 인식되게 된다. 이러한 방식은 평면 스크린 이외에도 회전하는 나선형 스크린을 통해서도 그 구현이 가능하다. 즉, 매우 빠른 속도(1200 rpm)로 회전하여 눈으로 볼 수 없는 회전나선 스크린의 표면 위를 향하는 레

이저 빔이 산란하여 voxel(volume pixel)이라 부르는 볼 수 있는 점광을 형성하게 된다. 원통형 디스플레이 내에서 발광하는 voxel의 공간상의 위치는 회전 나선과 이와 교차하는 레이저 빔의 순간 위치에 의해 결정된다. 칼라 영상은 적색, 녹색, 청색 레이저가 결합하여 구현 가능한데, 각각의 요소 레이저의 독립적인 변조에 의해 임의의 칼라가 혼합될 수 있다. 이 방식의 장점은 마치 3차원 물체가 투명 한 돔 안에 떠있는 듯한 입체감과 360도의 시야각을 가지므로 어느 방향에서도 이를 볼 수 있다는데 있다. 하지만 역시 빠른 속도의 기계적인 스캐닝이 필요하다는 점이 이 방식의 단점이다. 현재 Actuality Systems사의 Perspecta Spatial 3D 디스플레이가 프로토타입(prototype) 형태로 발표되었다.

3.2.3 교차빔 방식(crossed-beam display)

칼라를 갖는 voxel들이 두 개의 스캐닝 레이저 빔에 의해 지정되고 발광하는 형태의 3차원 디스플레이에 관한 연구는 1970년대 초반부터 행해져 왔으나 이에 필요한 물질을 찾는 것은 쉽지 않았다. 최근 그 해결책으로 고순도 희토류 이온(rare-earth ion)이 첨가된 유리가 제안되었는데 이러한 종류의 유리는 원래 가시광에 투명하다가 적절한 파장을 갖는 두 개의 적외선 빔이 그 안에서 교차할 때 발광하게 된다. 즉, 적외선으로부터 가시광이 생성되는(upconverted) two photon 흡수 현상이 일어나게 된다. 그 원리는 다음과 같다. 에너지 준위 E_0 에 있는 이온이 처음에 파장 λ_1 을 갖는 적외선 광을 흡수하여 에너지 준위 E_1 으로 여기되어 평균 τ_1 시간동안 머무른다. 이 기간 안에 파장 λ_2 를 갖는 또 다른 적외선 광을 이 이온이 흡수하면 이의 에너지 준위는 다시 E_2 로 여기되고 에너지 준위 E_0 로 돌아가면서 가시광을 발광하게 된다. 따라서 이러한 원리로 두 개의 적외선 레이저 빔이 교차할 때에만 voxel이 발광하고, 레이저 빔을 전체 디스플레이 부피에 대해 주사(scan)해주게 되면 임의의 3차원 형태로 발광시킬 수 있다. 물론 완전 칼라 디스플레이 시스템의 구현도 가능하나, 이를 위해서는 적, 녹, 청의 파장 대에 해당하는 세 개의 서로 다른 도핑 물질이 필요하다. 이 방식의 가장 큰 문제점으로는 사용되는 디스플레이 매질이 투명하므로 앞 영상에 숨겨져 있어야 할 뒤쪽 또는 내부의 상이 비쳐서 보이게 되므로 가려짐 현상이 일어나지 않는다는 것이다. 가려짐 현상은 실제로 회화 기법에서 깊이감을 인식하는

중요한 요소 중 하나로 이러한 단점은 이 방식의 응용 분야를 3D 비디오보다는 주로 CT나 MRI, CAD 등의 wireframe 영상으로 제한시킨다. 또한 현재 프로토타입 디스플레이가 제작된 상태지만 그 비용이 너무 비싸(10인치 큐브당 추정 단가: \$80,000) 이를 상용화 가능한 기술로 만들기 위해서는 매질의 대량 생산 등이 필요하다 할 수 있다.

3.3 홀로그래픽 입체 영상 디스플레이

홀로그래피란 빛의 회절과 간섭 현상을 이용하여 빛의 진폭 정보뿐만 아니라 위상 정보까지 기록 및 재생을 하는 방식으로써 이를 이용한 디스플레이는 완전한 깊이 정보와 높은 해상도를 가지는 3차원 디스플레이 방식이다. 이러한 홀로그래피의 기록과 재생에 대한 원리가 그림 8에 제시되어 있다. 먼저 기록을 위해서는 레이저에서 나온 가느 다란 빔을 렌즈를 통과시켜 확대시킨 후에 피사체와 부딪혀 산란된 빛인 물체광과 레이저에서 바로 나오는 기준광(참조광)을 동시에 기록 물질에 입사시켜 이에 의한 간섭 정보를 기록한다. 이렇게 간섭 정보가 기록된 기록 물질을 홀로그래피라 한다. 이렇게 기록된 정보를 재생할 때에는 기록 과정에서 사용하였던 참조광을 동일한 방향에서 입사시켜(경우에 따라서는 반대 방향에서 위상공액파를 입사시키기도 한다.) 회절을 일으키면 본래 피사체가 있었던 위치에 피사체와 동일한 상이 재현되게 된다²⁶⁻³¹⁾.

이러한 홀로그래피 기술은 여러 가지 장점을 가지고 있다. 먼저 홀로그래피는 현재 알려진 3차원 디스플레이 기술 중 양안시차와 폭주 뿐 아니라, 눈의 조절에도 모순이 없이 입체감을 줄 수 있는 유일한 기술이다. 또한 홀로그래피는 정보의 기록 밀도가 매우 높다. 이는 기본적으로 방대한 정보량을 가지는 3차원 정보의 기록에 홀로그래피가 본질적으로 유리하다는 것을 보여준다. 그러나 홀로그래피 기술은 여러 가지 단점도 가지고 있다. 먼저 기록 및 재생에(재생시에는 백색광을 쓰는 경우도 있다.) 코히어런트 광 혹은 단색광을 사용하여야 하기 때문에 디스플레이 기술로 이용하는데 있어 기록 환경이나 피사체 등에 있어 여러 가지 제약이 따른다. 또한 방대한 정보량으로 인해 화상 정보의 저장이나 전송 등에 있어서 치명적인 약점을 가진다.

홀로그래피의 종류는 매우 다양한데, 그 중 몇 가지를 간략히 살펴보면 다음과 같다.

3.3.1 무지개(rainbow) 홀로그램

무지개 홀로그램은 가로 방향의 긴 슬릿을 사용하여, 재생에 있어서 수직방향으로의 관찰방향을 제한하는 것인데, 백색광을 이용한 밝은 상의 재생이 가능하며 수직방향으로 다른 위치에서는 다른 색깔로 상이 보이게 하는 홀로그램 제작 기술이다. 이 홀로그램은 이미지 홀로그램의 하나인데, 보통 2단계의 촬영수순으로 만들어진다. 그림 9(a)

에 나타냈듯이 제 1단계에서 무지개 홀로그램화하고 싶은 피사체의 프레넬 홀로그램(제 1홀로그램)을 작성한다. 이 경우, 최종적으로 얻어지는 홀로그램의 시역을 넓게 하기 위해, 가로로 긴 홀로그램을 촬영하는 것이 특징이다. 다음으로, 이것을 실상재생해서, 제 2단계로 무지개 홀로그램(제 2홀로그램)을 작성한다. 이 때, 최초로 촬영된 프레넬 홀로그램은 수 mm 정도의 가로로 긴 슬릿형태로만 만

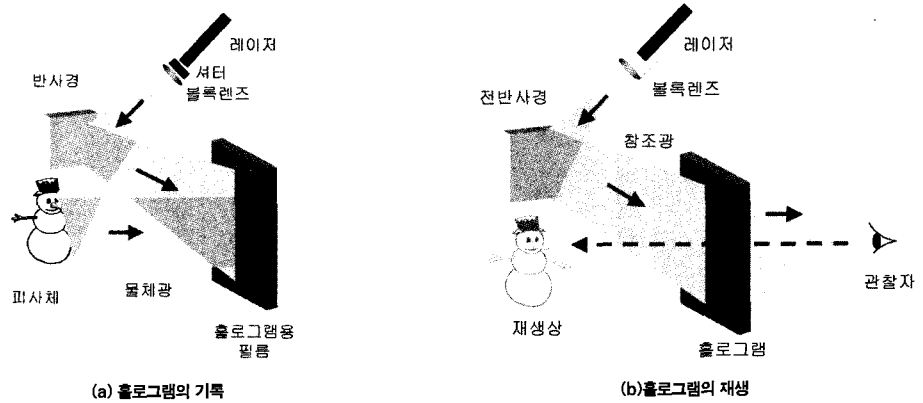


그림 8. 홀로그램의 기록과 재생

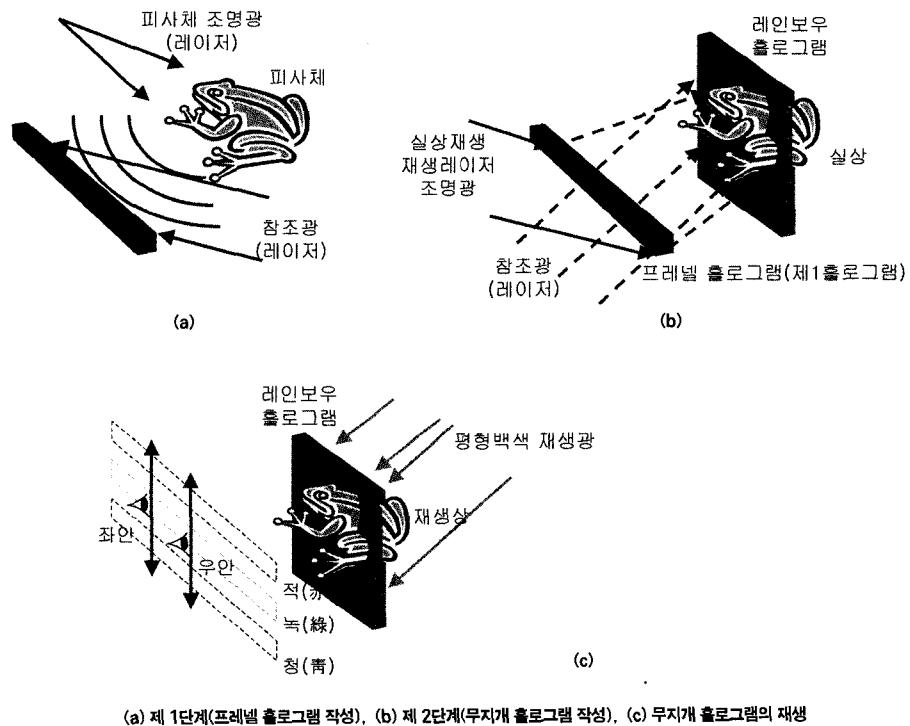


그림 9. 무지개 홀로그램의 기록과 재생

들어 상하방향의 치수를 제한한다. 또, 제 2단계의 무지개 홀로그램 기록 재료는, 실상이 생기는 물체 근처에 배치한다. 이리하여, 작성된 무지개 홀로그램을 배후에서 백색광으로 조명하면, 퇴색이 적은 양질의 재생상을 관찰할 수 있다. 무지개 홀로그램에서는 기록 때 사용한 레이저의 파장과 같은 색으로 재생할 수 있는 것은 관찰자가 제 1홀로그램의 슬릿이 있었던 위치에 눈을 둔 경우이며 눈을 상하로 이동시키면, 재생상은 붉은색에서 청색(무지개 색)으로 변화한다. 즉, 가로로 긴 슬릿의 사용으로 재생상의 세로 방향의 입체감을 버리고, 그 대신 통상의 백색광에 의한 재생을 가능케 하였다. 레인보우 홀로그램은, 인쇄기술로 대량 복제가 가능하기 때문에 신용카드나 지폐의 위조방지, 전화 카드 등에 널리 사용되고 있다.

3.3.2 리프만(Lippmann) 홀로그램

리프만 홀로그램의 작성 방법은 그림 10(a)에 나타나 있다. 리프만 홀로그램은 기록 물질에 직접 닿는 빛을 참조광으로 하고 기록 물질을 통과하여 피사체에 반사되어 기록 물질의 뒤쪽에서 입사하는 빛을 물체광으로 하여 간섭무늬를 기록한다. 이런 식으로 홀로그램을 작성하면, 간섭무늬는 두께 방향에 층상으로 형성되어 체적형의 홀로그램이 된다. 이 홀로그램에 그림 10(b)와 같은 방향에서 백색광을 조명하면, 적당한 파장의 빛이 선택적으로 회절되어 단색의 재생상을 만들게 된다. 리프만 홀로그램은 넓은 시역을 얻을 수 있고 빛의 이용률도 좋으므로, 상이 밝다는 특징이 있다. 또 리프만 홀로그램은 질감의 충실한 재현에 뛰어나므로 정확성이 요구되는 서적이거나 카탈로그 등의 정밀한 화상재현, 펜던트나 장식품, 디스플레이용의 홀로그램 등에 널리 사용되고 있다.

3.3.3 멀티플렉스 홀로그램

레이저를 피사체에 조명하여 홀로그램을 기록하는 기존의 방법과는 달리 보통의 카메라로 피사체를 다방면에서 촬영한 필름을 이용하여 홀로그램을 작성하는 방법을 인테그럴 홀로그램(integral hologram)이라고 한다. 멀티플렉스 홀로그램은 그 한 가지 방법이다. 이 방법은 1977년에 미국 멀티플렉스사의 Cross에 의해 개발된 것으로, 기존의 방법에서는 피사체로서 부적합하였던 인물, 풍경, 컴퓨터 그래픽 화상 등에 대해서도 홀로그램을 작성할 수 있는 특징이 있다. 작성 방법은 그림 11(a)에 나타난 바와

같이 피사체를 회전 테이블에 얹어놓고 피사체의 360도 방향에서의 모습을 35mm 필름에 1000~3000 프레임 정도로 촬영한다. 이 필름을 한 프레임씩 투영 렌즈와 원통형 렌즈를 통하여 확대하고 그 뒤의 적당한 위치에 세로로 긴 슬릿을 위치시킨 다음, 참조광을 더하여 홀로그램으로서 제작한다. 이렇게 작성된 홀로그램을 원통형으로 만들어 백색광을 조명하면 원통 내부에 입체상이 떠올라 보인다. 가로 방향의 시역이 360도로 넓게 잡을 수 있으므로, 장식이나 광고 등 디스플레이 용도에 널리 쓰이고 있다. 또한 멀티플렉스 홀로그램에 의해 얻어지는 입체감은 다른 홀로그래피 기술과 달리 오직 시차 정보에 의한 것이라 는 특징이 있다.

3.3.4 홀로그래픽 비디오 디스플레이

홀로그래픽 비디오 디스플레이는 광학적인 기록과정에서 만들어지는 홀로그램 대신 연산 작용을 통하여 얻은 전자 홀로그램을 실시간으로 구현할 수 있는 공간광변조기(spatial light modulator)에 입력하고 재생하는 과정을 통하여 목적하는 영상을 얻는 방법으로, 정보를 입력받는 공간광변조기로는 음향광변조기(acousto-optic modulator: AOM), LCD(liquid crystal display) 등이 있으며 컴퓨터를 통한 연산 작용으로 홀로그램을 작성하므로 컴퓨터 연산 홀로그램(computer-generated hologram)의 하나이다. 컴퓨터 연산을 위해서는 아날로그 신호인 홀로그램 간섭무늬를 디지털 신호로 변환해 주어야 한다. 그런데 공간광변조기의 대역폭의 제한으로 인하여 이러한 변환과정에서 인간의 눈이 구분할 수 있는 최고의 측면 해상도인 $1/60^\circ$ 에 이르는 완전한 정보량을 처리할 수 없다. 또한 이러한 방대한 양의 정보를 처리하기 위한 컴퓨터 연산 속도의 한계와 빛이 실제 간섭과 진행하는데 있어 나타나는 물리적인 현상을 기술하는 복잡한 수식을 처리하는데 드는 긴 시간도 전자 홀로그램이 해결해야 하는 문제점이다. 홀로그램의 연산체계의 복잡함을 해결하기 위하여 프레넬 홀로그램에 근거하여 간섭무늬를 계산하는 방법, 변형된 푸리에(Fourier) 홀로그램에 의한 계산 방법, 고전적인 프레넬 홀로그램에 근거하여 계산하더라도 연산속도를 개선하기 위해 새로운 방법인 룩업 테이블(look-up table), 호겔 벡터(Hogel vector)를 이용하는 방법 등이 제시되었고 이와 더불어 정보량을 줄이려는 노력등도 같이 병행되었다. 세계 최초로 홀로그래픽 비디오 디스플레이 시스템을

3차원 디스플레이 기술 개발 동향

구축한 곳은 미국 MIT의 Benton 교수팀으로, Mark I 과 Mark II 라 불리는 장비가 있다. MIT에서는 연속파(cw) 레이저를 사용하고 있어 AOM에서 음향파의 진행에 따른 상의 흐름을 보상해 주기 위하여 회전 다면경을 사용한다. 이는 부피가 매우 큰 광학 장비이므로 광학장비의 대형화와 제작의 어려움을 극복하기 위해 과거 KIST에서는 펄스 레이저를 사용하고 이 회전 다면경을 대신하여 정지된 다

면경 세트를 사용하여 시스템을 소형화 및 간소화함은 물론 기계적인 영상전달 장치를 줄임으로써 더욱 안정된 장치를 구성하였다. 일본의 TAO(Telecommunication Advancement Organization)에서는 여러 개의 액정디스플레이를 이용하여 공간광변조기로 사용되는 LCD의 화소수를 확대한 시스템을 구축하였다.

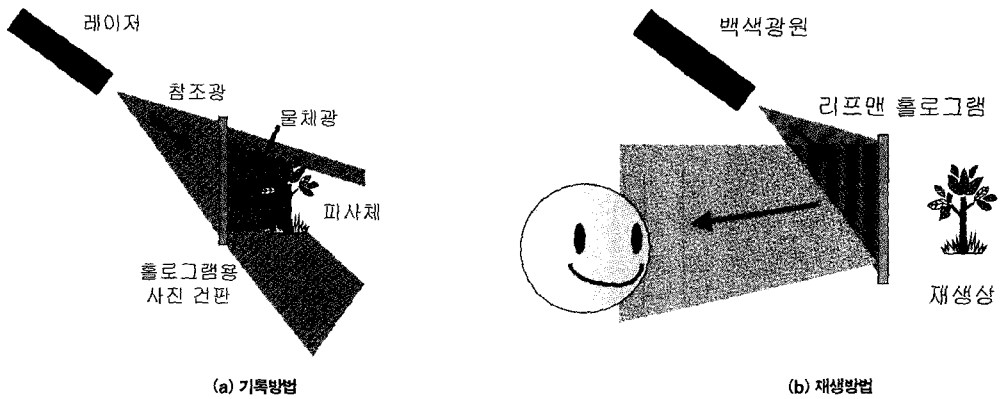


그림 10. 리프맨 홀로그램의 작성 방법

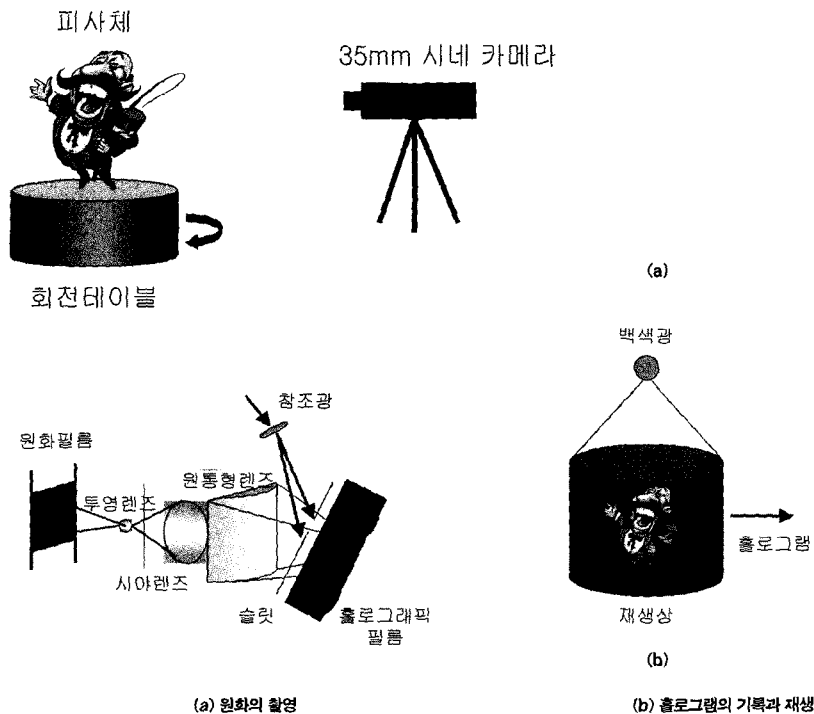


그림 11. 멀티플렉스 홀로그램의 작성방법

4. 맺음말

이상에서 살펴본 바와 같이 3차원 디스플레이 기술은 현재 세계적인 표준이 정해지지 않은 상태에서 각각의 방식들이 장단점을 공유하거나 대립하면서, 경쟁적으로 발전하고 있다. 그러므로 이러한 기술의 장단점을 상호 보완하기 위하여 각 기술들을 개별적으로 뿐 아니라 통합적으로 연구할 필요가 높아지고 있다. 홀로그래피 방식을 제외한 3차원 디스플레이 방식들은, 기존의 2차원 디스플레이 장치의 평면 정보로부터, 공간적으로 해상도를 낮추거나, 시간적으로 광효율 희생시켜, 3차원의 깊이 정보를 얻게 되므로, 3차원 디스플레이 기술의 발전을 위해서는 고해상도 디스플레이 장치와 같이 기존의 디스플레이 소자를 고성능화 하거나 새로운 고사양의 디스플레이 장치를 개발하는 것이 필요하다. 이러한 연구들과 함께, 기존의 개념을 넘는 새로운 아이디어와 방식의 모색이 앞으로의 3차원 디스플레이 기술의 연구에서 매우 중요한 과제라 할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 소고는 과학기술부의 해외첨단기술정보사업의 지원에 의해 이루어졌습니다.

참고문헌

- (1) T. Okoshi, "Three-dimensional displays," Proc. IEEE, vol. 68, pp. 548-564, 1980.
- (2) I. E. Sutherland, "A head-mounted three dimensional display," Proc. AFIPS, vol. 33, pp. 757-764, 1968.
- (3) J. Hamasaki, Y. Nagata, H. Higuchi, and M. Okada, "Real-time transmission of a 3-D image using volume scanning and spatial modulation," Appl. Optics, vol. 16, pp. 1675-1685, 1977.
- (4) E. Downing, L. Hesselink, J. Ralston, and R. Macfarlane, "A three-color, solid-state, three-dimensional display," Science, vol. 273, pp. 1185-1189, 1996.
- (5) N. Dodgson, J. Moore, S. Lang, G. Martin, and P. Canepa, "50" time-multiplexed autostereoscopic display," Proc. SPIE, vol. 3957, pp. 177-183, 2000.
- (6) Y. Kajiki, H. Yosikawa, and T. Honda, "Ocular accommodation by super multi-view stereogram and 45-view stereoscopic display," Proc. of The Third International Display Workshops(IDW'96), vol. 2, pp. 489-492, 1996.
- (7) I. P. Howard and B. J. Rogers, Binocular Vision and Stereopsis, Oxford Psychology Series, no. 29, Oxford University Press, 1995.
- (8) A. Woods, T. Docherty, and R. Koch, "Image distortions in stereoscopic video systems," Proc. of SPIE, vol. 1915, pp. 36-49, 1993.
- (9) V. I. Bobrinev, J. Y. Son, S.A. Shestak, S. H. Hwang, and H. W. Jeon, "Achromatized transmission-type holographic screen for a multiview stereoscopic image system," Applied Optics, vol.3 6, pp. 6605-6610, 1997.
- (10) S. K. Kim, Y. Kajiki, and T. Honda, "Three-dimensional display system for one observer usnig multiprojection of 2D images from an arc," Stereoscopic Displays and Applications XII, Proc. SPIE, vol. 4297, pp. 141-147, 2000.
- (11) A. Schwartz, "Head tracking stereoscopic display," IEEE Tran. Electron Devices, vol. 33, pp. 1123-1127, 1986.
- (12) G. J. Woodgate, D. Ezra, J. Harrold, N. S. Holliman, G. R. Jones, and R. R. Moseley, "Autostereoscopic 3-D display systems with observer tracking," Signal Processing: Image Commun., vol. 14, pp. 131-145, 1998.
- (13) K. Talmi and J. Liu, "Eye and gaze tracking for visually controlled interactive stereoscopic displays," Image Commun., vol. 14, pp. 799-810, 1999.
- (14) G. Lippmann, "La photographie integrale," Comptes-Rendus, vol. 146, pp. 446-451, 1908.
- (15) S.-W. Min, S. Jung, J.-H. Park, and B. Lee, "Three-dimensional display system based on computer-generated integral photography," The 2001 Stereoscopic Displays and Applications Conference, Photonics West, Proc. SPIE vol. 4297, pp. 187-195, San Jose, USA, Jan. 2001.
- (16) B. Lee, S. Jung, S.-W. Min, and J.-H. Park, "Three-dimensional display using integral photography with dynamically variable image planes," Optics Letters, vol. 26, pp. 1481-1482, 2001.
- (17) B. Lee, S.-W. Min, S. Jung, and J.-H. Park, "Computer-generated dynamic three-dimensional display using integral photography adopting Fresnel lenses," Algorithms and Systems for Optical Information Processing V, SPIE Annual Meeting, Proc. SPIE, vol. 4471, San Diego, CA, USA, pp. 9-17, Jul.-Aug. 2001.
- (18) B. Lee, S. Jung, J.-H. Park and H. Choi, "Recent progress in three-dimensional display based on intergral imaging," Journal of the Optical Society of Korea, vol. 6, pp. 133-142, Dec. 2002.
- (19) F. Okano, H. Hoshino, J. Arai, and I. Yuyama, "Real-time pickup method for a three-dimensional image based on integral photography," Applied Optics, vol. 36, pp. 1598-1603, 1997.
- (20) C. Chincock, "Volumetric imaging provides a walk-around view," Laser Focus World, vol. 30, p. 20, 1994.
- (21) Y. Kajiki, H. Yoshikawa, and T. Honda, "Auto-stereoscopic 3D video display using multiple light-beams with scanning," IEEE Trans. on CSVT, vol. 10, pp. 254-260, 2000.
- (22) H. Yamada, K. Akiyama, K. Muraoka, Y. Yamaguchi, "The comparison of three kinds of screens for a volume scanning type 3D display," TAO First Int. Symp., 1993 (Telecom. Advancement Org. of Japan, 2-31-19, Shiba, Minato-ku, Tokyo 105).
- (23) K. Hopf, "An autostereoscopic display providing comfortable viewing conditions and a high degree of telepresence," IEEE Trans. on CSVT, vol. 10, pp. 359-365, 2000.
- (24) D. Ezra, B. Omar, and G. Woodgate, "Autostereoscopic directional display

- apparatus," European Patent Application EP-A-0602 934, 1992.
- (25) S. Shestak, "최근의 체적 영상 기술에 대한 고찰," 광학과 기술, vol. 5, pp. 3-6, 2001.
- (26) H. Yoshikawa and K. Sasaki, "Image scaling for electro-holographic display", Proc. SPIE, vol. 2176, pp. 12-22, 1994.
- (27) H. S. Oh, H. W. Jeon, S. A. Shestak, S. K. Kim, J. Y. Son, H. Y. Lee, Y. J. Choi, and C. E. Kang, "Holographic video system with a pulsed laser", Japanese Journal of Applied Physics, vol. 37, pp. 1877-1881, 1998.
- (28) C. B. Buckhardt, "Information reduction in hologram for visual display," Journal of Optical Society of America, vol. 58, pp. 241-246, 1968.
- (29) J. Y. Son, V. I. Bobrinev, H. S. Lee, Y. J. Choi, and S. S. Kim, "Holographic screens for three dimensional image projection," Proc. SID, pp. 1224-1227, 2000.
- (30) S. A. Benton, "The second generation of the MIT holographic video system," Proc. TAO First Int. Sym. pp. S-3-1~6, 1993.
- (31) C. Cameron, D. A. Payne, M. Stanley, and C. W. Slinger, "Computational challenges of emerging novel true 3D holographic displays," Proc. SPIE, vol. 4109, pp. 129-140, 2000.

약 력



이병호

1987. 서울대학교 전자공학과 졸업(학사, 공과대학 수석졸업)
 1989. 서울대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사)
 1993. University of California at Berkeley, Dept. EECS 졸업(Ph.D.)
 1994. 9. ~ 현재. 서울대학교 전기공학부 근무. 현재 부교수
 1998. 대한전자공학회 해동논문상 수상
 1999. 국가지정 홀로그래피 기술 연구실 지정(과학기술부)
 1999. 대한전기학회 표창
 2000. 한국광학회 논문상 수상
 2000. IEEE Senior Member로 선정
 2001. 제 11회 과학기술우수논문상 수상(한국과학기술단체총연합회)
 2002. 제 5회 젊은과학자상 수상(대통령상)
 2002. SPIE Fellow로 선정
 2002. 한국과학기술한림원 준회원으로 선정
 E-mail: byoungho@plaza.sun.ac.kr