

홀로그래픽 스테레오그램에 관한 샘플링 이론과 관찰영역의 확대

김은석 · 김 남

충북대학교 정보통신공학과

(1996년 5월 4일 받음)

실물을 이용한 홀로그램과 다르게, 홀로그래픽 스테레오그램(Holographic Stereogram: HS)은 비교적 적은 수의 2차원 영상정보를 합성하여 제작된다. 부적절한 샘플링에 의해 나타나는 영상 사이의 간섭(aliasing artifacts) 특성을 조사하였으며, 새로운 샘플링 이론을 제안하고, 이를 홀로그래픽 스테레오그램 제작에 이용하였다. 또한 관찰범위(viewing zone)를 확대하기 위한 광학 시스템을 제시하였다. 이러한 분석결과들은 일반적인 홀로그래픽 스테레오그램의 제작과 컴퓨터를 이용한 홀로그래픽 스테레오그램의 제작에 응용할 수 있다.

I. 서 론

3차원 영상 매체 기술은 지금까지의 2차원 영상 매체와는 다르게 일상적으로 느끼는 물체의 입체감을 그대로 전달하기 위한 새로운 분야로, 다가오는 21세기에 가장 핵심이 되는 영상 기술로 주목되고 있다. 현재까지 이 분야는 크게 실질적인 입체는 아니지만 입체감을 느끼도록 하는 입체 영상 방식과 실물의 입체감을 재현하는 3차원 영상 구현 방식의 두 가지로 나뉘어 각각 개발 발전되어 왔다. 편광판이나, 컬러 필터, 그리고 동기 신호가 주어지는 액정 셔터를 이용한 안경방식과 렌티큘라와 액정을 이용한 무안경식 방식으로 다시 나뉘지는 입체 영상 방식은 시야각 확대, 다자 시청, 피로감, 깊이감 등 아직도 해결해야 할 문제가 많이 남아 있다. 홀로그래픽 스크린, 홀로그래픽 비디오 등 입체 차원을 벗어나 실제의 3차원 영상을 구현하는 방식 또한 신호추출, 정보량처리, 실시간 신호처리, 표시장치, 기록장치 등 앞으로 연구되어야 할 문제들이 산재해 있다.

홀로그래픽 스테레오그램은 3차원 영상 구현 방법 중 홀로그래피 방식으로 회절된 빔에 의해 직접 깊이감 있는 영상을 재생하는 방식이며, 3차원 영상 구현시 문제가 되는 정보량을 크게 줄이고, 기록이 용이하여 현재 가장 관심 있게 연구되고 있는 분야 중 하나이다. 이 방식은 3차원 영상을 만들기위해 E. Leith와 J. Upatnieks^[1]의 연구에 바탕을 둔 홀로그래피 디스플레이(holography display)와 렌티큘라와 parallax barrier 디스플레이 기술에 이용되고 있는 스테레오스코피(stereoscopy) 방식이

합쳐진 것으로, 홀로그래피가 빛을 기록할 수 있는 무한대의 능력을 갖는 매체를 제공하는 반면, 스테레오스코피는 3차원 영상을 만들기위한 정보의 양 중 상당량을 줄일 수 있는 장점을 갖고 있다.

이러한 특성 때문에 홀로그래피 스테레오그램에서는 촬영 카메라(capture camera), 관찰범위(viewing zone), 관찰거리(viewing distance) 등이 중요 분석 항목으로 되어있다. 카메라(또는 컴퓨터그래픽)에 의해 촬영된 2차원 정보는 디스플레이면에서 임의의 관찰거리 만큼 떨어진 위치의 특정 관찰범위 내에서 재생된다. 이를 분석하기 위한 접근법은 홀로그래픽 스테레오그램을 만드는 과정과 밀접한 관계를 갖고 있다. 일반적으로 관찰에 기초한 전통적이고 홀로그래피적인 스테레오스코피 방법은 3차원 영상의 생성과 왜곡을 이해하기 위한 직접적인 방법을 제공한다.

본 논문에서는 기본적인 홀로그래픽 스테레오그램의 제작방법을 나타내었고, 샘플링에 의한 영상 사이의 간섭현상을 분석하였다. 현재 사용되고 있는 샘플링 수 계산법^[2]과 다른 새로운 계산방법을 제시하였으며, 이를 이용하여 홀로그래픽 스테레오그램을 제작하였다. 또한, 이 샘플링 값의 변화에 따른 재생된 3차원 영상을 전통적인 관찰에 기초하여 분석하였으며, 관찰범위와 관찰거리를 확대하기 위한 제작방법을 제안하였다. 이들 분석을 간단히 하기 위해 촬영물체를 매우 가까운 거리로 제한하였고, 회절효과는 다른 일반적인 논문^[2]에 나타나 있는 것을 사용했으며, 작은 크기의 영상에 한하여 나타내었다.

II. 홀로그래픽 스테레오그램의 제작방법과 디스플레이

본 논문에서는 수평시차만을 고려한 2단계(two-step horizontal parallax only: HPO) 홀로그래픽 스테레오그램에 대해 나타내었지만, 이 형태를 통해 분석된 결과는 홀로스테레오그래픽 디스플레이(holo-stereographic display)나 제작에 광범위하게 이용될 수 있다. D. DeBitetto^[3]에 의해 연구되고 S. Benton^[4]에 의해 변형된 간단한 2단계 모델은 그림 1과 같다. 마스터 홀로그램(master hologram: H1)은 기준광과 물체광에 의해 노출되는 폭이 W_{slit} 인 좁은 수직 슬릿(slit) 홀로그램의 시리즈로 구성된다. N_{slit} 은 슬릿 홀로그램의 수이며, 따라서 마스터 홀로그램의 전체 폭 W_{H1} 은

$$W_{H1} = N_{slit} \times W_{slit} \quad (1)$$

슬릿에 노출되는 물체광은 수직으로 D_{view} 떨어진 거리에 위치한 그라운드 글라스 디퓨전 스크린(ground-glass(GG) diffusion screen)에서 나오는 광으로 하고, 이 디퓨전 스크린의 뒷쪽에서 2차원 영상의 시리즈가 순서대로 투영된다. 이 영상들은 회전판 위에 물체를 올려

놓고 회전시키면서 고정된 카메라에 의해 촬영한다. 영상면(image plane)과 촬영카메라 사이의 거리관계는 디퓨전 스크린과 홀로그래픽 슬릿 사이 1:1의 대응관계를 갖으며, 물체의 촬영각도(=샘플링 수)는 기하학적 방법에 의해 계산된다.

디퓨전 스크린 위에 2차원 영상이 투영되면 이것이 물체광(object beam)으로 작용하고, 여기에 기준광(reference beam)을 합쳐 해당 슬릿에 기록함으로써 마스터 홀로그램이 제작된다. 슬릿으로 들어오는 기준광은 광축에서 벗어난(off-axis) 평행광으로, 물체광과 각도를 이루며 마스터 홀로그램에 중첩된다. 이 과정을 통해 마스터 홀로그램에는 카메라에 의해 촬영된 모든 2차원 영상정보가 순서대로 기록된다.

전사 홀로그램(transfer hologram: H2)은 마스터 홀로그램에서 D_{view} 만큼 떨어진 거리에서 슬릿에 의해 투영되는 디퓨전 스크린의 영상면에 위치한다. 마스터 홀로그램 제작시 사용한 기준광과 반대 방향에서 다시 평행광을 조사하면, D_{view} 의 거리에 수차나 확대가 없는 영상들이 겹쳐서 나타나고, 여기에 다시 구면파를 기준광으로 하여 조사하면 백열전구와 같은 백색광원(white light source)에 의해 관찰될 수 있는 홀로그래픽 스테

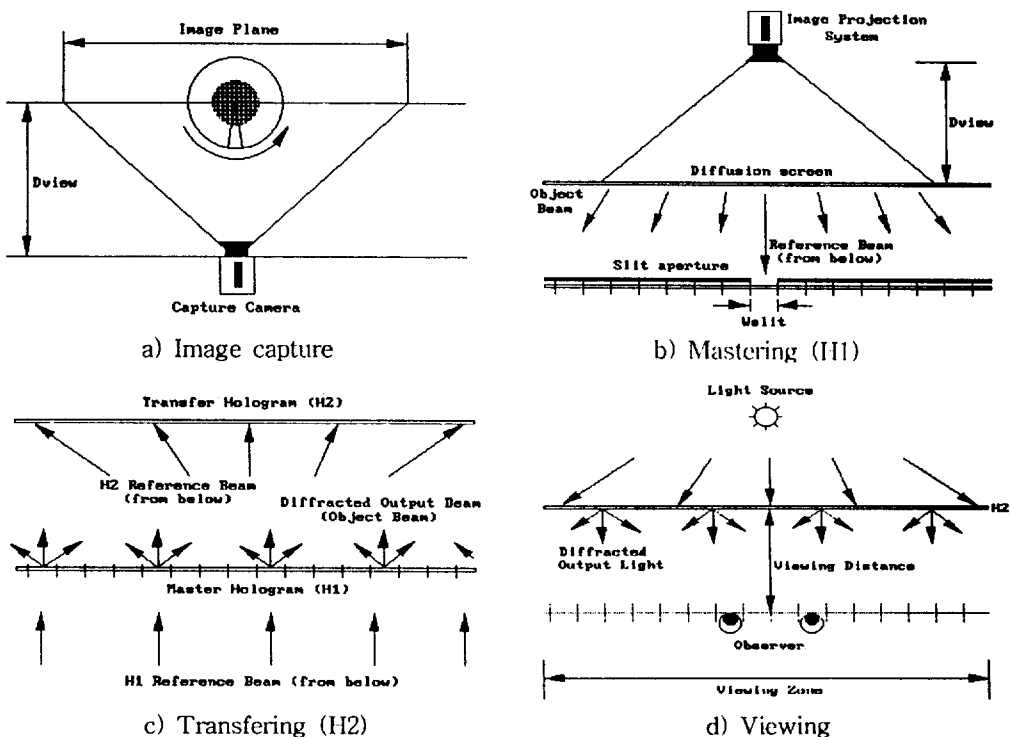


그림 1. Two-step horizontal parallax only holographic stereogram.

레오그램이 제작된다. 관찰자가 전사 홀로그램에서 D_{view} 만큼 떨어져 위치하면 슬릿의 위치에 눈이 있게 되므로 연속적인 2차원 영상의 변환에 의해 3차원 영상을 볼 수 있다. 관찰자가 영상을 볼 수 있는 거리를 관찰거리라 하며, 전사 홀로그램에서 부터 영상정보의 관찰이 가능한 관찰범위는 마스터 홀로그램의 수평넓이(W_H)와 같다.

III. 영상 사이의 간섭(Aliasing artifact)

전통적으로 홀로그램 제작자들은 홀로그래픽 스테레오그램의 슬릿폭 W_{slit} 을 결정하는 간단한 표준을 갖고 있다. 슬릿폭이 너무 넓으면 하나의 프레임에서 다음 프레임으로 영상의 변화가 뚜렷하게 나타나고, 너무 좁으면 영상의 수와 홀로그래픽 노출이 증가하여 제작이 어렵다. 보통 사용되는 절충안은 W_{slit} 을 사람의 동공의 넓이 이하(약 1.5~3 mm)로 하는 것이다. 이렇게 제작된 홀로그래픽 스테레오그램 앞에서 관찰자가 움직이면, 동공에는 슬릿의 전체 정보가 들어오고, 따라서 연속적으로 변하는 영상이 나타난다. 관찰자의 눈이 두 개의 슬릿 사이에 놓이면, 슬릿에 기록된 2차원 영상을 선형적으로 결합하거나 합쳐진 영상이 관찰된다. 두 영상의 비중은 관찰자의 눈에 들어오는 슬릿의 양에 따라 결정된다.

그림 2는 관찰자가 하나의 슬릿에서 다음 슬릿으로 천천히 이동함으로써 관찰되는 홀로그래픽 스테레오그램의 영상을 나타낸 것이다. 영상면에서 비교적 많이 떨어진 곳에 위치한 임의의 작은 점에 대해 스테레오그램의 근사값은 실제 점과 다르게 나타난다. 특히, 두 개의 영상 사이에는 틈이 존재하며, 단일 영상이기 보다는 다수의 불연속적인 영상으로 나뉜다. 재생상은 점영상이 수평하게 영상면 위에서 울타리 모양의 피켓 뒤로 움직이는 것처럼 보인다. 이 패턴이 원래의 점이 있던 깊이와 같지 않으므로 깊이감의 충돌이 일어날 수

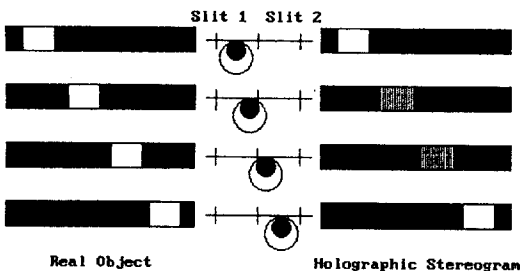


그림 2. The difference when the real object and holographic stereogram images are observed.

있고, 홀로그래픽 스테레오그램을 관찰할 때 의도된 만큼의 3차원 효과가 줄어든다. 이러한 현상을 영상 사이의 간섭이라 하며, 깊이감 있는 홀로그래픽 스테레오그램의 제작에 매우 중요한 노이즈로 작용한다.

IV. 샘플링 이론

홀로그래픽 스테레오그램에서 2차원 영상의 결합에 의해 발생한 영상 사이의 간섭 문제는 정확한 샘플링에 의해 제거될 수 있다^[2]. 최소 샘플링 주파수는 Nyquist rate로 알려져 있으며, 이산적인 시스템에서 샘플링비가 기록하는 연속신호의 두 배 이하가 되면 신호에러가 발생한다. 불충분한 샘플링에 의한 영상 사이의 간섭은 저주파이고, 출력신호에서 주기적인 에러를 만든다

본 논문에서는 기하학적 방법에 의한 2차원 영상의 샘플링 수 계산법을 제안하였으며, 이를 홀로그래픽 스테레오그램 제작에 적용하였다.

2차원 영상의 샘플링 수를 계산하기 위해 먼저 ϕ 값을 구한다. 그림 3에 이에 대한 관계가 나타나 있다. ϕ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\phi = \phi_2 - \phi_1 \quad (2)$$

여기서 ϕ_1 과 ϕ_2 는 각각

$$\phi_1 = \tan^{-1}\left(\frac{x_1}{y_1}\right), \quad \phi_2 = \tan^{-1}\left(-\frac{x_2}{y_2}\right)$$

이며, 두 점 (x_1, y_2) , (x_2, y_2) 는 점 P1과 P2에서 원으로의 접선의 방정식으로 간단히 구해질 수 있다.

그리고 이 값을 이용하여 물체의 촬영각도 θ 를 구하면,

$$\theta = \phi/N \quad (3)$$

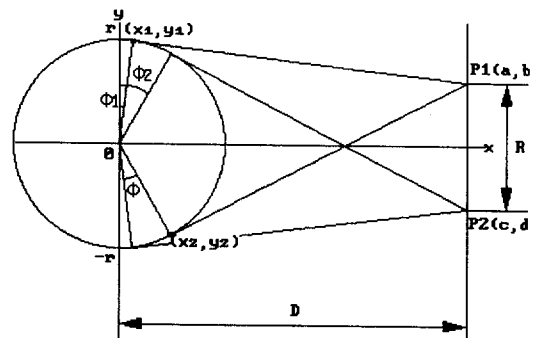


그림 3. Calculation of sampling angle using geometrical method.

- (a) Optical system for holographic stereograms;
- (b) A photograph of the optical system

이고, 여기서 두 눈 사이의 거리 D 만큼의 마스터 홀로그래프에 기록되어야 할 2차원 영상의 샘플링 수 N 은

$$N = D/W_{slit} \quad (4)$$

이며, W_{slit} 은 슬릿폭이고 1.5~3 mm 사이의 값을 갖는다.

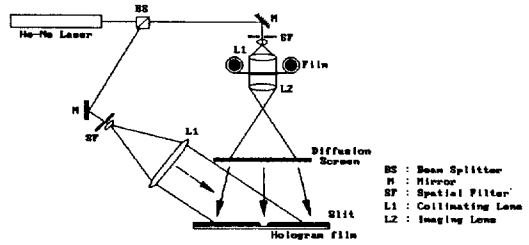
카메라 1과 2을 각각 점 $P1$ 과 $P2$ 의 위치에 놓고, R 만큼 떨어진 위치에 물체가 있다고 할 때, θ 만큼의 각도차를 갖는 연속적인 2차원 영상을 기록·관찰하면, 눈의 움직임에 따라 항상 일정한 각도차를 갖는 두 개의 영상을 동시에 볼 수 있다. 따라서 관찰자의 관찰위치가 변해도 관찰범위 내에서는 일정한 입체감을 느끼게되며, 단지 눈의 이동에 따라 물체의 다른면을 보게 된다. 이것이 스테레오스코피의 기본원리이다.

V. 실험 및 결과 고찰

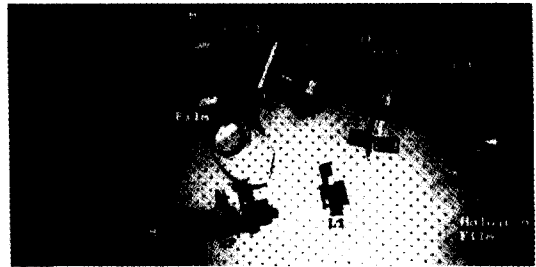
본 연구에서는 일반적인 홀로그래픽 스테레오그램의 제작과정과 샘플링 각에 따른 영상의 변화를 관찰하였다. 또한 가장 큰 노이즈로 작용하는 영상 사이의 간섭을 전통적인 방법에 의해 분석하였다.

홀로그래픽 스테레오그램의 광학 시스템과 실제 사진이 그림 4에 나타나 있다. 빔 스플리터(beam splitter: BS)로 나눈 빔을 기준광과 물체광으로 하고, 두 개의 미러(mirror)를 통해 홀로그래프 필름 위에서 수렴하도록 한다. 기준광은 평행광으로 필름의 법선에 45° 각도로 입사되며, 물체광은 평행광으로 필름을 통과한 후 렌즈에 의해 확대되어 홀로그래프 필름과 평행하게 놓인 디퓨전 스크린에 입사된다. 2차원 영상의 기록에는 Kodak slide-film을, 3차원 영상의 기록에는 Agfa 8E75 film을 사용하였다. 홀로그래프 제작시 광원으로 He-Ne laser를 사용하였으며, 노광량은 180 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ 로 하였다⁵⁾. 홀로그래프의 정확한 처리는 상용표백 방식을 사용했으며, 이는 표 1에 나타나 있다.

일반 성인의 동공 사이 간격 $D=65$ mm, 슬릿의 폭 $W_{slit}=3$ mm, 물체와 카메라와의 거리 $R=300$ mm, 물체의 최장 직경 $2r=200$ mm일 때, 한쪽 눈에 의해서만 보이는 물체의 범위 $\phi=12.4^\circ$ 이고, 식 (3), (4)을 이용하여 하나의 2차원 영상의 촬영각도 θ 를 계산하면 약 0.57°가 된다. 실제 제작에는 광학소자의 한계에 의해 근사값을 이용했으며, 제작된 홀로그래픽 스테레오그램에서 재생된 영상의 사진이 그림 5(a)에 나타나 있다. 또한 샘플링 각도를 다르게 했을 때 나타나는 영상의 부자연스러움과 영상 사이의 간섭을 관찰하기 위해 1°, 2°, 3°로 촬영한 2차원 영상에 의해 제작된 홀로그래픽 스테레오그램에서



a) Optical system for holographic stereograms



b) A photograph of the optical system

그림 4. Optical system for holographic stereograms.

표 1. Chemical processing

과	정 시	간
1. 노출		
2. 현상 (D-19)		4분
3. 수세		1분
4. 정착(Kodak rapid fixer)		4분
5. 수세		1분
6. 표백		적당(2~6분)
7. 수세		10분
8. 건조		
IPA 50% sol.		2분
IPA 100% sol.		2분

관찰되는 재생상이 그림 5(b), (c), (d)에 나타나 있다.

샘플링 수를 너무 적게 하면 기록된 신호 사이의 차이가 너무 커 영상 사이의 간섭이 증가함을 볼 수 있다. 자연스러운 영상의 변화는 결국 샘플링된 신호 사이의 차가 적을 때 만들어지고, 이를 위해서는 2차원 영상 촬영시 물체와의 거리를 멀리해 ϕ 값을 줄이거나 N 값을 크게하는 것이 효과적이거나, ϕ 값을 작게하면 관찰범위 내에서 영상의 변화가 적어 입체감이 감소하고, N 값이 커지면 영상의 해상도가 감소되어 두 성분은 모두 한계값을 갖는다.

홀로그래픽 스테레오그램에서 또 하나 중요한 요소는 넓은 관찰범위를 확보하는 것이다. 관찰범위를 확대하기

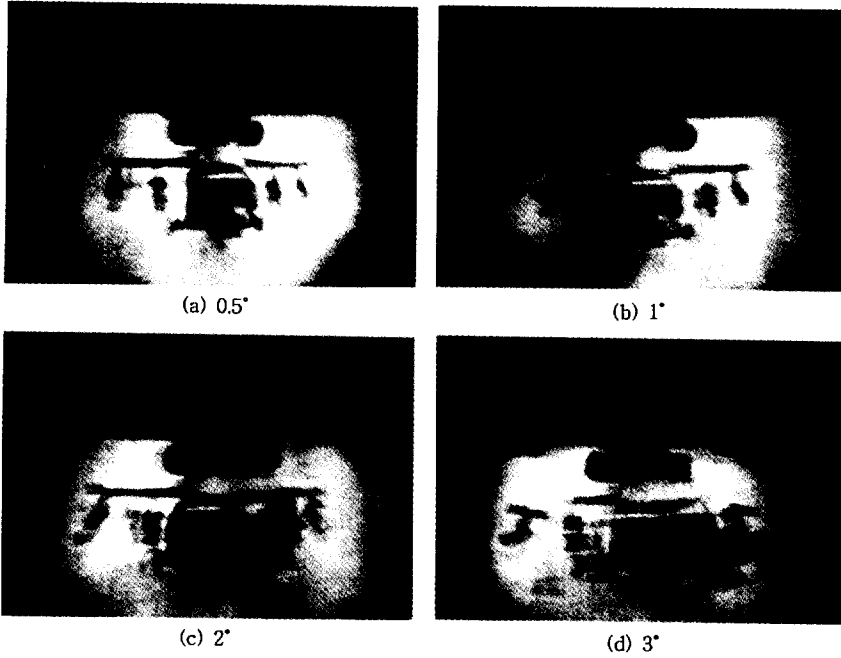


그림 5. Reconstructed image of holographic stereograms when the sampling is changed.

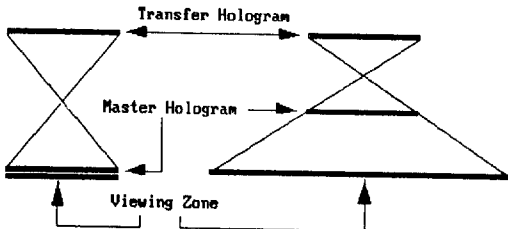


그림 6. Extension of the viewing zone.

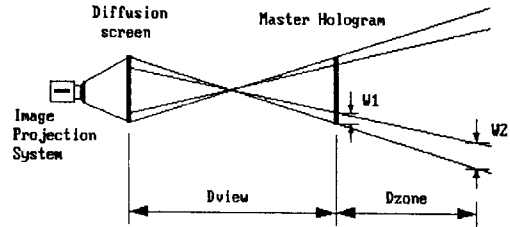


그림 7. Extension of the viewing distance.

위해서는 마스터 홀로그램 제작시 디퓨전 스크린에서 나오는 광을 넓게 분포시켜 마스터 홀로그램의 크기를 크게하는 방법과 마스터 홀로그램면(master plate)과 전사 홀로그램면(transfer plate)를 매우 가깝게 함으로써 전형적인 스테레오그램 보다 훨씬 더 넓은 관찰범위를 갖도록 하는 방법이 있다. 전자의 경우는 영상 사이의 간섭 영향의 증가 없이 양질의 홀로그래픽 스테레오그램을 제작할 수 있는 반면, 물체광을 넓고 고르게 확산 되도록 하는 광학적 장치를 구성하는데 어려움이 있다. 후자의 경우, 원래의 마스터 홀로그램의 정보를 전사 홀로그램으로 보낼 때 전사 홀로그램용 건판을 앞으로 당기기만 하면 되므로 제작의 간편함은 있지만, 영상 사이의 간섭 영향이 커져 관측거리가 제한되는 단점이 있다. 이 두 경우 모두 마스터 홀로그램의 영상은 관찰

자가 디스플레이면 앞에서 서서히 이동함으로써 전사 홀로그램면에 대해 천천히 움직이 듯이 보이며, 영상을 보일 수 있는 관찰 위치가 증가한다. 이 관찰범위의 확대가 그림 6에 나타나 있다.

관찰범위의 확대와 함께 중요하게 고려해야 할 요소는 관찰거리의 확대이다. 그림 7에서 보듯이 마스터 홀로그램 제작시 물체광과의 거리를 멀리함으로써 가능하다. 디퓨전 스크린과 마스터 홀로그램 사이의 거리 D_{view} 가 멀어질수록 디스플레이 면에서 하나의 슬릿에 해당하는 ΔW_{slit} 의 확대율이 적어진다. ΔW_{slit} 은 동공에 들어오는 슬릿의 정보이므로, 이 값의 변화 -동공이 최적의 영상 정보를 받아들이는 슬릿폭(약 1.5~3 mm)-가 눈에 띄지 않을 만큼의 거리에서는 약간의 영상 사이의 간섭 영향은 있지만 충분히 이를 보상할 만한 관찰거리를 확보하게

된다.

관찰범위와 관찰거리 사이에는 절충점(trade-off)이 존재하며, 이들 모두를 확대하기는 어렵다. 이들 사이의 적절한 값을 선택하여 홀로그래프를 제작하면, 원하는 목적의 홀로그래픽 스테레오그램을 제작할 수 있을 것이다.

VI. 결 론

영상이 입체감을 갖는 원리와 이를 이용한 홀로그래픽 스테레오그램의 제작과정을 나타내었다. 기하학적 방법에 의해 샘플링 수를 계산하였고, 넓은 관찰범위와 관찰거리를 갖기 위한 홀로그래픽 스테레오그램의 제작방법을 제시하였다. 영상 사이의 간섭 영향을 최소화 하기 위해 디스플레이면에 나타나는 슬릿상은 동공의 넓이 이하로 제한하였고, 넓은 관찰범위와 관찰거리를 확보 하기 위해서는 마스터 홀로그래프의 넓이를 넓게하고, 디퓨전 스크린과는 되도록 멀리하여 제작하는 것이 효과적임을 보였다.

본 논문에 나타낸 여러 가지 분석과 제작 방법들은 일반적인 2단계 홀로그래픽 스테레오그램 뿐만 아니라, 컴퓨터를 이용하는 홀로그래픽 스테레오그램에 모두 적용이 가능하다. 또한 관찰범위와 관찰거리를 제작방법에

따라 임의로 조절할 수 있어 원하는 목적의 홀로그래프 제작 가능함을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] E. N. Leith and J. Upatnieks, Scientific American, **212**, 24-35 (1965).
- [2] P. St. Hilaire, Appl. Opt. **33**(5), 768-774 (1994).
- [3] D. J. DeBitetto, Appl. Opt. **8**(8), 1740-1741 (1969).
- [4] S. A. Benton, Optics in Entertainment, SPIE 391 (1983).
- [5] N. Kim, Optics Communication, **105**(2), 1-6 (1994).
- [6] P. Hariharan, Optical Holography, pp.119-130, Cambridge University (1984).
- [7] I. Glaser and A. A. Friesem, Three-Dimensional Imaging, SPIE 120 (1977).
- [8] J. T. McCrickerd, JOSA, **62**, 64-70 (1972).
- [9] N. D. Haig, Appl. Opt. vol. 12-2, pp. 419-420 (1973).
- [10] D. Diner and D. Fender, Human Engineering in Stereoscopic Viewing Device, Plenum Press (1993).

Sampling Theory and Widening of the Viewing Area for Holographic Stereograms

Eun-Seok Kim and Nam Kim

Department of Computer & Communications, Chungbuk National University, Chongju 360-763, Korea

(Received: May 4, 1996)

Unlike holograms of real objects, holographic stereograms(HS) are made using a relatively small number of synthesized 2D images. The influence of aliasing artifacts caused by insufficient or improper sampling is presented, and a new sampling theory is proposed, which is used to making holographic stereograms. Also, the optical system for extension of viewing distance and viewing zone is proposed. Results of this analysis can be applied to design normal holographic stereograms and computer based holographic stereograms.