《연구논문》 Korean Journal of Optics and Photonics, Volume 23, Number 1, February 2012
DOI: http://dx.doi.org/10.3807/KJOP.2012.23.1.032

집적영상 방식 3D 디스플레이의 최적 입체감에 관한 분석

최희진†

세종대학교 물리학과
㉾ 143-747 서울특별시 광진구 군자동 98번지

(2012년 1월 2일 받음, 2012년 1월 19일 수정본 받음, 2012년 1월 25일 게재 확정)

본 논문에서는 집적영상방식 3D 디스플레이에서 문제점으로 지적되고 있는 입체감 증가에 따른 영상의 왜곡을 분석하고 인간 시각계의 인지한계에 근거하여 최적입체감을 구현할 수 있는 영역을 제안한다. 또한 실험결과를 통하여 이를 검증하였다.

Analysis of the Optimized 3D Depth of Integral Imaging

Hee-Jin Choi†

Department of Physics, Sejong University, Seoul 143-747, Korea

(Received January 2, 2012; Revised manuscript January 19, 2012; Accepted January 25, 2012)

In this paper, an analysis of the optimized 3D depth of integral imaging is proposed. We achieve this by calculating the amount of image distortion and considering the threshold of recognition in the human visual system. Experimental results are also provided to test the theory.

Keywords: Integral imaging, Optimized 3D depth
OCIS codes: (110.2990) Image formation theory; (100.6890) Three-dimensional image processing

I. 서 론

최근 평판 디스플레이 기술의 급속한 발전에 힘입어 여러 3D 디스플레이 기술을 적용한 제품들을 어렵지 않게 만나볼 수 있게 되었다. 이러한 3D 디스플레이 제품들은 우수한 화질과 저렴한 가격을 내세워 점차 시장 점유율을 늘려가고 있으며 이에 대응하여 여러 분야에서 다양한 3D 컨텐츠도 제작되고 있다. 그러나 위와 같은 장점들에도 불구하고 현재 제품화된 대부분의 3D 디스플레이 기술들은 사용자가 특수 안경을 착용해야 하는 불편함이 있다. 때문에 특수 안경 없이도 입체 영상을 즐길 수 있는 무안경식 3D 디스플레이 기술에 대한 기대가 높아지고 있다. 집적영상 기술은 이러한 무안경식 3D 디스플레이 기술들 중 하나로서, 평판 디스플레이 기술을 기반으로 상하좌우 모든 방향으로의 시차를 갖는 full color 입체 영상을 제공할 수 있다는 장점을 갖고 있어 최근 많은 관심을 받고 있다[1-4]. 집적영상 기술은 그림 1과 같이 디스플레이 장치에 입체 정보를 갖는 기초 영상(elemental image)들을 표시하고 그 전면의 렌즈 어레이를 통하여 기초 영상들을 하나의 입체 영상으로 결상하는 방식이다. 이에 사용되는 렌즈 어레이는 작은 기초 렌즈들이 모여 있는 형태로서, 일반적으로 각 기초 렌즈들은 같은 크기와 초점거리를 갖도록 제작되기 때문에이 초점거리는 렌즈 어레이의 초점거리이기도 하다. 따라서 관찰자는 렌즈 어레이의 각 기초

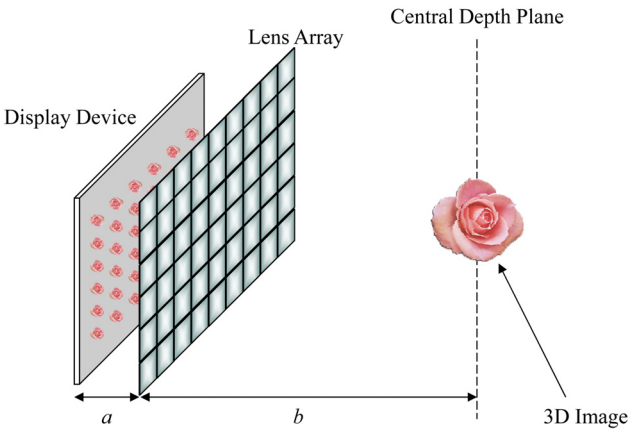

FIG. 1. The principles of integral imaging 3D display.

†E-mail: hjchoi@sejong.ac.kr
Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

렌즈(elemental lens)를 통해 결상된 상들이 모여있는 형태의 입체 영상을 보게 된다.

집적영상 기술을 이용하여 입체 영상을 표시하는 방법은 크게 깊이감 우선 방식과 해상도 우선 방식의 두 가지로 분류할 수 있다. 깊이감 우선 방식은 디스플레이 장치와 렌즈 어레이 사이의 간격을 렌즈 어레이의 초점 거리와 동일하게 설정하는 방법으로서, 입체감이 큰 영상을 표시하는 데 장점을 갖는 방식인 반면 입체 영상의 해상도가 렌즈 어레이를 구성하는 기초 렌즈의 개수와 같아지게 되어 영상의 화질이 떨어진다는 단점을 갖는다. 해상도 우선 방식은 디스플레이 장치와 렌즈 어레이 사이의 간격이 초점 거리와 다른 경우로서 그림 1과 같이 렌즈 어레이를 통해 결상된 상이 일반적으로 Central Depth Plane(CDP)라고 불리우는 초점이 가장 잘 맞는 위치에 나타나게 된다. 이 경우 입체 영상의 해상도는 깊이감 우선 방식보다 향상되지만, 표현 가능한 입체 영상의 위치가 CDP 주변으로 한정되는 단점이 있어 이와 관련한 여러 연구가 진행되어 왔다[5-8]. 본 논문에서는 해상도 우선 집적영상 방식에서 입체 영상의 위치가 CDP에서 멀어짐에 따라 발생하는 화질 왜곡을 분석하고 이를 인간공학적 측면에서 분석하여 화질 왜곡현상이 사용자에게 인지되지 않을 정도로 작게 발생하는 영역의 크기를 구함으로서, 최적화된 입체감을 구현하는 방법을 제안하고 이를 실험을 통하여 검증한다.

II. 분 석

해상도 우선 방식 집적영상 기술에서 CDP의 위치는 아래 식 (1)과 같은 렌즈 공식으로 구할 수 있다.

$$\frac{1}{a}+\frac{1}{b}=\frac{1}{f} \tag{1}$$

위 식에서 a와 b는 그림 1에 표시된 바와 같이 각각 렌즈 어레이와 디스플레이 장치 사이의 거리, 렌즈 어레이에서 CDP의 위치까지의 거리를 나타내며, f는 렌즈 어레이의 초점거리이다. 따라서 CDP에 결상되는입체 영상과 이를 나타내기 위한 기초 영상 사이의 광학적인 배율 M_1은 아래 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$M_1=-\frac{b}{a}=-\frac{b-f}{f} \tag{2}$$

위 식에서 마이너스(-) 기호는 입체 영상이 그림 1과 같이 도립 실상인 경우를 나타낸다.

만약 입체 영상을 CDP가 아닌 다른 위치 b'에 표시하고자 하는 경우, 이를 위해 디자인된 기초 영상과 입체 영상 사이의 배율 M_2는 아래 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$M_2=-\frac{b'-f}{f} \tag{3}$$

그러나 실제로는 렌즈 어레이와 디스플레이 장치 사이의 거리 a가 고정되어 있기 때문에, 디스플레이 장치에 표시되는 모든 기초 영상들은 일괄적으로 배율 M_1만큼 확대 또는 축소되어 CDP에 상을 맺게 된다. 따라서 CDP가 아닌 다른 위치에 표시하고자 했던 입체 영상들도 M_2가 아닌 M_1만큼 확대 또는 축소된 기초 영상들로부터 표시되므로 영상의 왜곡이 발생하게 된다. 이러한 왜곡 현상은 그림 2(a)와 같이 각 기초 렌즈를 통해 결상된 상들의 크기가 너무 작아($M_1<M_2$) 하나의 입체 영상으로 모이지 않거나, 반대로 그림 2(b)와 같이 크기가 너무 커서($M_1>M_2$) 제대로 표시되지 않는 영역이 있는 입체 영상이 표시되는 형태로 나타나게 된다. 따라서 M_1과 M_2의 차이가 클수록 왜곡현상이 심하게 나타나게 되며, 이는 CDP의 위치 b와 표시하고자 하는 입체 영상의 위치 b'의 차이와 연관성을 갖는다. 즉, b와 b'의 차이가 클수록 큰 입체감을 갖는 영상을 표시할 수 있으나, 영상의 왜곡현상도 심해지게 된다.

위에서 구한 배율은 기초 영상이 얼마나 확대 또는 축소되

(a) (b)

FIG. 2. Distortion of 3D image in the resolution prior integral imaging when the 3D image is (a) closer toand (b) farther from the observer than the CDP.

느냐를 나타내는 비율이므로 실제로 나타나는 왜곡현상의 크기를 구하기 위해서는 확대되는 기초 영상의 크기를 정해야 한다. 기초 영상이 표시되는 디스플레이 장치는 자기 자신의 픽셀크기보다 작은 기초 영상은 표시할 수 없으므로, 본 논문에서는 디스플레이 장치의 픽셀크기를 기준으로 왜곡현상의 정도를 계산한다. 디스플레이 장치의 픽셀크기를 p라 하면, b'만큼의 입체감을 갖는 입체 영상을 이루는 하나의 픽셀이 갖는 왜곡의 크기 D_{pixel}는 아래 식 (4)와 같이 계산할 수 있다.

$$D_{\pi xel} = |p(M_s - M_2)| = \left| p\left(\frac{b'-f}{f} - \frac{b-f}{f}\right)\right| = \left| p\left(\frac{b'-b}{f}\right)\right| \quad (4)$$

실제로 각 기초 렌즈를 통해 결상되는 입체 영상은 위 픽셀들의 조합으로 이루어지므로, 하나의 기초 렌즈를 통해 결상되는 입체 영상이 갖는 왜곡의 크기 D_{total}는 픽셀 하나의 왜곡 크기인 D_{pixel}에 하나의 기초 렌즈를 통해 보여지는 픽셀 개수 n을 곱함으로써 아래 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$D_{total} = nD_{pixel} = n\left|p\left(\frac{b'-b}{f}\right)\right| \quad (5)$$

위 식에서 n은 디스플레이 장치의 픽셀들이 M_1만큼의 배율로 확대되었을 때, ϕ만큼의 크기를 갖는 하나의 기초 렌즈를 통해 몇 개나 보이는 지를 계산함으로써 구할 수 있고, 따라서 식 (5)를 아래 식 (6)과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$D_{total} = n\left|p\left(\frac{b'-b}{f}\right)\right| = \frac{\phi}{pM_1}\left|p\left(\frac{b'-b}{f}\right)\right| = \phi\left|\frac{b'-b}{b-f}\right| \quad (6)$$

위와 같은 과정을 통하여 렌즈 어레이를 이루는 기초 렌즈의 크기 ϕ, CDP의 위치 b, 입체 영상의 위치(입체감의 정도) b', 그리고 렌즈 어레이의 초점거리 f로 입체 영상이 갖는 왜곡 현상의 크기를 계산할 수 있다.

3D 디스플레이를 통하여 구현된 입체 영상은 최종적으로 관찰자의 눈을 통해 보여지므로 집적영상 방식의 적절한 입체감을 결정하는 것은결국 관찰자의 눈에 보여지는 왜곡 현상의 크기가 어느 정도 이상이 되어야 심각한 왜곡으로 인지되는지를 구하는 것과 밀접한 관련이 있다. 다만, 인간의 시각계는 개인차에 따라 분별할 수 있는 왜곡의 정도가 다르기 때문에 본 논문에서는 그 기준치를 시력 1.0을 평가하는 기준인 1/60°의 시각(視角)으로 정하고 그 이상의 크기를 갖는 왜곡 현상이 발생하지 않는 입체감을 최적 입체감으로 정하고자 한다. 즉, 시력 1.0인 사람이 구별 가능한 왜곡 현상이 발생하는 입체 영상의 위치 b'를 허용 가능한 최대 입체감으로 정한다. 이는 현재 가장 대중적으로 사용되는 Full HD(High-Definition: 1920 × 1080)의 해상도를 갖는 평판 디스플레이 제품들의 최적 시청거리가, 일반적으로 하나의 픽셀이 1/60°의 시각을 갖도록 하는 거리인 화면 세로크기의 3배로 정해지는 것과 도 같은 원리이다. 따라서 1/60°의 시각은 화질을 평가할 때 2D와 3D 모두에서 높은 연관성을 갖는 주요한 기준으로 사용할 수 있어 본 분석에 적용하기에도 적합하다. 이러한 기준을 적용하면 렌즈 어레이로부터 L_o만큼 떨어진 거리에 있는 시력 1.0인 관찰자가 해상도 우선 집적영상 방식의 3D 디스플레이를 통해 입체 영상을 관찰할 때, 표현 가능한 최적 입체감의 크기 b'-b를 아래와 같이 구할 수 있다.

$$D_{total} = \phi\left|\frac{b'-b}{b-f}\right| < L_o \tan\left(\frac{1}{60°}\right) \quad (7)$$

$$-\frac{L_o(b-f)}{\phi}\tan\left(\frac{1}{60°}\right) < b'-b < \frac{L_o(b-f)}{\phi}\tan\left(\frac{1}{60°}\right) \quad (8)$$

III. 실험결과

위 이론을 실제 실험 결과를 통하여 검증하였다. 실험을 위하여 0.25 mm의 픽셀 크기 p를 갖는 액정 디스플레이 장치와 22 mm의 초점거리 f와 10 mm의 기초 렌즈 크기 φ를 갖는 정사각형 기초 렌즈들로 이루어진 렌즈 어레이를 이용하여 CDP의 위치 b가 100 mm가 되도록 렌즈 어레이와 액정 디스플레이 장치 사이의 거리 a를 28 mm로 맞추어해상도 우선 집적영상 방식 3D 디스플레이를 제작하고, 입체 영

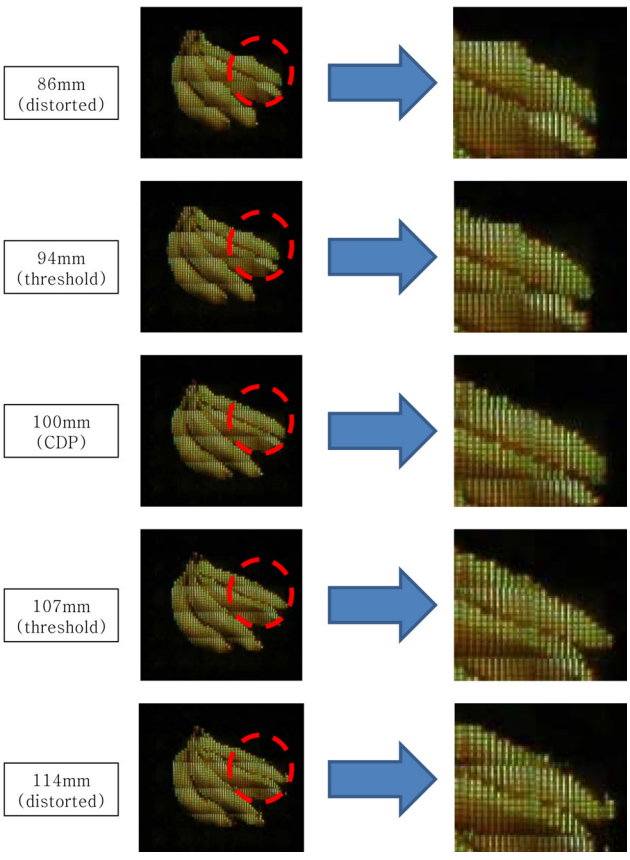

FIG. 3. Experimental results of 3D images in various 3D depths with different distortion.

상의 위치 b'를 바꾸어 가며 각 위치 별로 생기는 입체 영상의 왜곡을 촬영하였다. 렌즈 어레이와 카메라 사이의 관찰거리 L_o는 3100 mm로 하였으며 이러한 파라미터들을 식 (8)에 대입하면 예상되는 최적 입체감의 범위는 약 7 mm 임을 알 수 있다. 즉, 입체 영상의 위치가 CDP로부터 7 mm 이상 떨어지게 되면 영상이 왜곡되는 크기가 $1/60^o$의 시각을 넘어서게 되므로 최적 입체감을 갖는 영역은 렌즈 어레이로부터 93 mm~107 mm 만큼 떨어진 영역이 된다. 이를 검증하기 위하여 렌즈 어레이로부터 86 mm, 93 mm, 100 mm(CDP), 107 mm, 114 mm만큼 떨어진 곳에 형성된 입체 영상들을 디지털 카메라로 촬영한 사진이 그림 3에 각각 나타나 있다. 각 사진은 3100 mm의 관찰거리에서 촬영되었기 때문에, 화면에 나타나는한 픽셀만큼의 왜곡이 $1/60^o$의 시각을 갖게 되므로 이를 기준으로 각 영상에서의 왜곡의 크기를 가늠할 수 있다. 그림 3의 각 영상에서 동일한 부분을 확대하였을 때, 93 mm와 107 mm에서는 왜곡의 정도가 한 픽셀($1/60^o$) 내외로 크지 않으나 86 mm와 114 mm에 위치한 입체 영상의 경우에는 왜곡의 크기가 2~3 픽셀 정도로 확연하게 커졌음을 알 수 있으며 이는 육안으로 관찰한 결과와도 일치한다.

IV. 결 론

본 논문에서는 해상도 우선 집적영상방식 3D 디스플레이에서 발생하는 입체영상의 왜곡정도와 입체감과의 상관관계를 분석하고 시력 1.0을 갖는 관찰자의 시각인지한계에 근거하여 최적화된 입체감을 갖는 영역을 구하는 방법을 제안하였으며 실험을 통하여 이를 검증하였다. 이러한 연구결과는 고품질 입체영상을 구현하는 무안경식 3D 디스플레이 기술 개발의 기초연구로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 세종대학교 교내연구비지원에 의한 논문임.

References

1. G. Lippmann, “La photographie integrale,” C. R. Acad, Sci. **146**, 446-451 (1908).
2. F. Okano, H. Hoshino, J. Arai, and I. Yuyama, “Real-time pickup method for a three-dimensional image based on integral photography,” Appl. Opt. **36**, 1598-1603 (1997).
3. J.-H. Park, K. Hong, and B. Lee, “Recent progress in three-dimensional information processing based on integral imaging,” Appl. Opt. **48**, H77-H94 (2009).
4. B. Lee, S. Jung, and J.-H. Park, “Viewing-angle-enhanced integral imaging by lens switching,” Opt. Lett. **27**, 818-820 (2002).
5. S.-W. Min, J. Kim, and B. Lee, “New characteristic equation of three-dimensional integral imaging system and its applications,” Jpn. J. Appl. Phys. **44**, L71-L74 (2005).
6. J. Hong, J. Kim, J.-H. Park, and B. Lee, “Analysis of the expressible depth range of three-dimensional integral imaging system,” J. Opt. Soc. Korea **8**, 65-71 (2004).
7. J.-S. Jang, F. Jin, and B. Javidi, “Three-dimensional integral imaging with large depth of focus by use of real and virtual image fields,” Opt. Lett. **28**, 1421-1423 (2003).
8. H. Choi, Y. Kim, J.-H. Park, J. Kim, S.-W. Cho, and B. Lee, “Layered-panel integral imaging without the translucent problem,” Opt. Express **13**, 5769-5776 (2005).