양안식 3차원 디스플레이에서의 깊이 지각

DOI: 10.3938/PhiT.22.032

김 주 환

Depth Perception in Stereoscopic 3D Displays

Joohwan KIM

This research investigates the depth perception in three stereoscopic 3D (S3D) display techniques: temporal interlacing, color interlacing, and spatial interlacing. In temporal interlacing, the left eye's image and the right eye's image are shown alternatively in time. The temporal delay between the two eyes' images distorts the depth of objects in horizontal motion. In color interlacing, each color channel interlaces the two eyes' images temporally; at each color channel, the perceived disparity is distorted as in temporal interlacing. Because the human visual system estimates the disparity by using brightness not color, the depth distortion can be reduced by carefully selecting the interlacing order. Spatial interlacing shows the left eye's image in odd-numbered rows and the right eye's image in even-numbered rows. Information loss in the vertical direction can affect the binocular disparity of oblique lines, leading to a distortion in the perceived depth.

서 론

3차원 디스플레이에는 여러 가지 방식이 있는데, 이 중에서 양안식 3차원 디스플레이는 양안 시차(兩眼 視差, binocular disparity, 두 눈에 보이는 영상의 차이)를 이용하여 3차원 정보를 전달하는 디스플레이를 일컫는다. 이는 입체 영상을 표시

Fig. 1. Temporal interlacing S3D display presents an object in horizontal motion with disparity of 0. Left: The position of the object. Right: The perceived disparity.

하는 가장 간단한 방식이며 가장 널리 사용되는 방식이기도 하다. 예컨대, TV나 영화관에서 특수 안경을 끼고 보는 3차원 영상이 바로 이 방식이다. 이러한 양안식 3차원 디스플레이의 구현하는 방식에는 시간 교차법, 공간 교차법, 색 교차법 등 여러 가지가 있는데, 이들은 모두 3차원 영상 내의 양안시차에 시간적 또는 공간적 오차를 더하게 되어 관찰자의 깊이 지각을 왜곡할 수 있다. 비록 영화관에서는 두 대의 프로젝터와 서로 직교하는 두 가지 편광 필터를 이용하여 깊이 왜곡이 없는 3차원 영상을 재생할 수도 있으나, 영화관용 프로젝터는 수천만 원 이상을 호가하기 때문에 보통 프로젝터 한 대로 3차원 영상을 재생하고 있다. 본 특집기사에서는 여러 가지 양안식 3차원 디스플레이 방식에서 발생할 수 있는 깊이 왜곡에 대해서 살펴본다.

시간 교차법

시간 교차법이란 좌안과 우안의 영상을 시간적으로 번갈아가면서 보여주는 방식으로, 3차원 영상의 해상도를 저하시키지 않아 가장 널리 사용된다. 또한, 영화관에서 많이 이용하는 DLP 프로젝터는 반응 속도가 매우 빠르기 때문에 시간 교차법을

저자약력

김주환 박사는 서울대학교 박사(2009)로서, 2009년부터 현재까지 UC, Berkeley에서 박사후 연구원으로 재직 중이다. (joohwankim@berkeley.edu)

Fig. 2. The measurement of the depth distortion in temporal interlacing. Left: Stimulus movie. Right: Concept of the experiment.

구현하기 쉽다. 하지만 좌안과 우안 영상 사이의 시간차 때문에 왜곡된 깊이를 지각할 수 있다.

시간 교차법에서의 깊이 왜곡에 대한 간략화된 이론적 설명은 다음과 같다.^[1] 시차가 0이고 수평 방향으로 이동하는 물체를 시간 교차법으로 재생하는 경우를 생각해보자. 그림 1의 좌측 그래프에서 가로축은 시간, 세로축은 화면 상에서의 위치, 우상향하는 얇은 대각선은 수평방향으로 이동하는 물체의 궤적이다. 비록 물체는 연속적으로 움직이고 있지만, 실제 화면에 표시되는 물체의 위치는 샘플링 주기(T)마다 갱신될 것이다. 보통 좌안 영상이 우안 영상보다 먼저 표시되므로, 실제 화면 상에 표시되는 물체의 운동 궤적은 실선(좌안 영상) 또는 점선(우안 영상)과 같다. 우측의 그래프는 이러한 상황에서 지각하는 시차를 보여준다. 가로축은 시간, 세로축은 양안 시차이며 시간적으로 이웃하는 좌안과 우안 영상 간의 시차를 점들로 표시하였다. 같은 샘플링 주기 안에서의 좌안 영상과 우안 영상을 비교하면 물체가 같은 위치에 있어 시차는 0이다. 하지만 샘플링 주기를 건너서 이웃한 좌안 영상과 우안 영상을 비교하면 좌안 영상에서만 물체의 위치가 갱신되어 시차가 0이 아니다. 이러한 경우에 인간의 시지각 시스템이 시차를 지각하는 정확한 원리에 대해서는 아직 논란의 여지가 있으나,^[2,3] 결과적으로 시차의 시간적 평균값(검은 점선)을 지각한다고 알려져 있다. 이 검은 점선과 가로축 간의 거리가 바로 깊이 왜곡의 크기이다. 깊이 왜곡의 크기는 물체의 수평 방향 속력과 비례하며 물체의 운동 방향이 바뀌면 깊이 왜곡의 방향 또한 바뀐다. 또한 같은 속도로 운동하는 물체에 대해서는 샘플링 주기가 짧아질수록 깊이 왜곡의 크기가 작아진다.

본 연구진은 깊이 왜곡을 실험적으로 측정해보았다. 실험에서 사용한 시각 자극은 그림 2의 좌측과 같이 여러 개의 단색 물체가 원형 궤적을 그리며 회전하고 있는 동영상이었다. 먼저 영상 내의 물체들의 시차가 모두 0인 경우를 생각해보자. 깊이 왜곡은 수평 성분의 속도에 비례하므로, 원형 궤적의 수직 방향 양 끝단에서 깊이 왜곡이 가장 심하고 그 방향은 서로 반

Fig. 3. The measured depth distortion in temporal interlacing (Reprinted with permission from the Society for Information Display).^[1]

대일 것이다. 따라서 깊이 왜곡이 있을 경우 관찰자는 회전 궤적이 앞 또는 뒤로 기울어진 것으로 지각한다. 본 연구진은 깊이 왜곡의 정도를 측정하기 위해 영상 내의 물체에 시차를 주어 회전 궤적을 기울여주었다. 만약 영상 내의 시차가 시간 교차법에 의한 깊이 왜곡을 상쇄한다면 그림 2의 우측에서처럼 회전 궤적이 기울어 보이지 않을 것이다. 본 실험의 목적은 깊이 왜곡을 상쇄하는 만큼의 시차를 찾아내는 것이었다. 그림 3은 이렇게 측정한 깊이 왜곡이다. 가로축은 물체의 속도, 세로축은 깊이 왜곡의 정도, 점선은 이론적인 깊이 왜곡 예측치, 실선으로 이어진 점들은 실험적으로 측정한 깊이 왜곡이다. 물체의 속력이 느릴 때에는 측정치가 이론적 예측치와 일치하지만 속력이 빠를 때에는 측정치가 예측치로부터 벗어나는 것을 볼 수 있다. 이는 인간의 시지각 시스템이 시공간적 시차를 어떻게 계산하는가와 관련이 있으며, 아직 알려지지 않은 부분이 있어 정확한 설명은 어렵다.

한편, 샘플링 주기와 화면 갱신 주기가 다른 경우도 종종 있다. 한 샘플링 주기 당 화면 갱신을 여러 번 하는 것을 다중 섬광(multi-flash)이라고 한다. 많은 영화들의 샘플링 주기는 24 Hz이지만 영화관에서 사용하는 프로젝터들은 대개 화면 갱신 주파수가 72 Hz이다. 즉, 한 화면을 세 번 보여준 후에 새로운 화면으로 넘어간다(삼중 섬광 triple-flash). 최근 샘플링 주파수를 높여서 촬영한 HFR(High frame rate) 영화들의 샘플링 주기는 48 Hz, 화면 갱신 주파수는 96 Hz이며 각 화면은 두 번 표시된다(이중 섬광 double-flash). 이러한 경우 같

REFERENCES

- [1] D. M. Hoffman, V. I. Karasev and M. S. Banks, Journal of the Society for Information Display **19**, 271 (2011).
- [2] J. C. A. Read and B. G. Cumming, Journal of Vision **5**, 417 (2005).
- [3] N. Qian and R. D. Freeman, Journal of Vision **9**, 1 (2009).

Fig. 4. Temporal interlacing with double-flash (left) and triple-flash (right). The object is in horizontal motion with disparity of 0. Upper panels show the position of the object. Lower panels show the perceived disparity.

Fig. 5. The measured depth distortion with multi-flash (Reprinted with permission from the Society for Information Display).^[1]

은 샘플링 주기에 속하는 좌안 영상과 우안 영상의 수가 더 많아지므로 깊이 왜곡 또한 줄어들 것이라고 예측할 수 있다. 다시 한 번 시차가 0이고 수평 운동을 하는 물체의 깊이 지각을 살펴보자. 이때의 화면 상에서의 물체 운동과 시차 지각을 그래프로 표현해보면 그림 4와 같다. 좌측은 이중 섬광의 경우이며 시간적으로 이웃하는 좌안과 우안 영상을 비교할 때 4쌍마다 1쌍씩 0이 아닌 시차가 나타난다. 우측은 삼중 섬광의 경우이며 6쌍마다 1쌍씩 0이 아닌 시차가 나타난다. 샘플링

Fig. 6. The principle of conventional color-interlacing.

주기가 같으므로 두 경우 모두 잘못된 시차의 크기는 같다. 그러나 비교하는 양안 영상의 수가 다르기 때문에 결과적으로 지각하게 되는 시간적 평균값이 달라진다.^[1] 즉, 다른 조건이 동일할 때 깊이 왜곡은 샘플링 주기 당 화면 갱신 횟수에 반 비례한다.

그림 5는 실험을 통해 측정한 다중 섬광 방식에서의 깊이 왜곡이며 그림 2의 자극을 사용하였다. 여기서도 물체의 운동 속도가 느릴 때에는 이론적 예측치와 측정치가 일치하며 화면 갱신 횟수가 많을수록 깊이 왜곡의 크기는 작아지는 경향을 보인다.

색 교차법

색 교차법의 핵심 요소는 파장 대역이 좁은 광원을 사용하는 프로젝터와 대역 통과 필터를 이용하여 만든 안경이다. 색 교차법의 개념은 그림 6에 나타나있다. 색 교차법의 광원은 빨강, 초록, 파랑의 삼원색이 모두 좌안과 우안용 대역을 따로 가지고 있으며 각 대역은 좁고 서로 겹치지 않도록 배치되어 있다. 그림 6에서는 각 색상마다 상대적으로 왼쪽에 위치한 대역이 좌안용 대역, 오른쪽에 위치한 대역이 우안용 대역이다. 그리고 안경에 사용되는 대역 통과 필터는 각각 해당하는 눈을 위한 대역만을 통과시키도록 설계되어 있다. 만약 프로젝터 2대를 두고 하나는 좌안용 광원, 다른 하나는 우안용 광원을 사용한다면 깊이 왜곡이 없는 입체 영상을 감상할 수 있다. 하지만 앞서 설명한 바와 같이 경제적인 이유로 프로젝터 1대를 이용하는 것이 일반적이다. 즉, 프로젝터의 광원 앞에 좌안과 우안용 대역 통과 필터를 시간적으로 번갈아 배치시키며 좌안과 우안 영상을 재생한다. 이렇게 하면 관찰자 입장에서는 시간 교차법에서와 마찬가지로 좌안과 우안 영상이 번갈아 눈에 들어오게 되고 왜곡된 깊이를 지각하게 된다.

본 연구진은 깊이 왜곡을 최소화하는 색 교차법을 제안하였

Fig. 7. The color interlacing proposed for reduced depth distortion.

Fig. 8. Prediction on the depth distortion in the proposed color interlacing.

다.^[4,5] 색 교차법은 6가지 과장 대역(좌안과 우안을 위한 삼원 색) 중에서 3가지 대역씩을 골라서 시간적으로 배분하면 될 뿐, 굳이 좌안용 대역과 우안용 대역을 번갈아 사용하지 않아도 된다. 본 연구진은 깊이 왜곡이 양안 영상 간 시간 차이에서 생긴다는 점에 착안하여 그림 7과 같은 색배치를 제안하였다. 먼저 좌안의 초록 성분과 우안의 빨강과 파랑 성분을 표시하고, 다음 순간에는 좌안의 빨강과 파랑 성분과 우안의 초록 성분을 표시한다. 이렇게 하면 각 시점마다 양안 영상이 모두 표시되면서도 양안 영상 간 밝기 차이를 최소화할 수 있을 것이다.

색 교차법으로 시차가 0이며 수평 운동하는 물체를 재생하는 경우를 생각해보자. 그림 8의 좌측 그래프에서처럼 초록 성분에서는 좌안 영상(실선)이 먼저, 그리고 보라 (빨강과 파랑) 성분에서는 우안 영상(점선)이 먼저 표시된다. 이때의 깊이 왜곡은 그림 8의 우측 그래프에서처럼 초록과 보라에서 정 반대 방향으로 일어난다. 만약 인간의 시지각 시스템이 깊이를 지각할 때에 색채 별로 따로 지각한다면 두 가지 깊이를 느끼게 될 것이다. 하지만 밝기를 이용하여 깊이를 지각한다면 깊이 왜곡은 현저히 줄어들 것이다. 본 연구진은 이를 확인하는 실험

Fig. 9. The measured depth distortion in the proposed color interlacing.

험을 수행하였다.^[4]

이번에도 회전하는 물체를 담은 동영상을 이용하여 실험을 진행하였다. 물체의 색상은 5가지였으며 이들은 순수한 초록색부터 순수한 보라색까지 초록과 보라의 밝기 비율을 순차적으로 변화시켜 얻은 색상들이었다. 실험 결과는 그림 9와 같다. 가로축은 물체의 속도, 세로축은 깊이 왜곡의 정도, 실선으로 연결된 점들은 해당 색상에서의 깊이 왜곡이다. 각 색상의 점선은 밝기를 이용하여 깊이를 지각할 때의 깊이 왜곡 예측치이다. 초록이나 보라 중 한 가지 성분만이 있을 경우에는 시간 교차법과 다를 바 없다. 단, 초록과 보라의 좌안과 우안 영상 표시 순서가 반대이므로 같은 크기의 깊이 왜곡이 정반대 방향으로 나타난다. 재미있는 것은 두 성분이 섞여 있을 경우에도 점선과 실선이 거의 일치한다는 점이다. 즉, 밝기의 비율에 따라 깊이 왜곡의 방향과 크기가 정해지는 양상을 보인다. 따라서 프로젝터를 1대만 사용하는 색 교차법에서는 본 연구진에서 제안한 색상 배치가 깊이 왜곡을 최소화한다는 것을 증명하였다.

공간 교차법

공간 교차법은 홀수 번째 줄로 좌안 영상, 그리고 짝수 번째

REFERENCES

- [4] J. Kim, P. V. Johnson and M. S. Banks, *Proceedings of SPIE*, 8648, 86480N (2013).
- [5] A. Simon and H. Jorke, *SID Symposium Digest of Technical Papers* **42**, 317 (2011).

Fig. 10. Two methods of generating the stereoscopic images for spatial interlacing. Up: Direct allocation. Down: Averaged allocation.

줄로 우안 영상을 보여준다. 이 방식은 일반적으로 편광을 이용해서 구현한다. 즉, 홀수 번째 줄과 짝수 번째 줄 앞에 각각 서로 직교하는 편광 필터를 배치한다. 그리고 관찰자는 편광 필터로 만들어진 특수 안경을 착용하는데 왼 눈에는 홀수 번째 줄과 같은 편광 필터, 오른 눈에는 짝수 번째 줄과 같은 편광 필터를 사용한다. 이렇게 하면 왼 눈으로는 홀수 번째 줄, 오른 눈으로는 짝수 번째 줄만을 볼 수 있게 된다. 이러한 공간 교차법에서 화면에 표시할 영상을 만드는 방법은 그림 10에 나타난 것과 같이 두 가지가 있다. 첫째(그림 10위)는 좌안 영상의 홀수 번째 줄과 우안 영상의 짝수 번째 줄을 각각 화면의 홀수 번째 줄과 짝수 번째 줄에 배치시키는 것이며 이는 수직 방향으로 다운 샘플링(down sampling)을 하는 것과 같이 에일리어싱(aliasing)이 나타날 수 있다. 이를 이 글에서는 직접 할당법이라고 칭한다. 둘째(그림 10 아래)는 각 영상에서의 두 줄씩을 평균을 내어서 화면 상의 한 줄씩에 배치시키는 것이다. 이를 평균 후 할당법이라고 칭한다.

디스플레이의 화소 크기는 관찰자의 거리를 감안하여 겨우 식별이 가능할만한 크기(1/60도의 시야각)로 결정되어 있다. 따라서 수직 방향으로 화소 간 거리가 두 배가 되면 영상의 해상도를 저하하며, 이는 깊이 지각에도 영향을 미친다. 시차가 0이고 비스듬하게 우상향하는 직선의 경우를 생각해보자. 직접 할당법을 사용하면 눈에 보이는 좌안과 우안 영상이 그림 11과 같다. 인간이 시차를 지각할 때에는 좌안과 우안 간에서 망막에 맺힌 영상의 모양이 가장 비슷한 부위를 찾아내는 계산을 거친다. 표준 관찰 거리에서는 각 화소가 식별 가능하므로 그림 11에 그려진 빨간 화살표들 중 하나와 같은 시차를 지각하게 된다. 이 화살표들은 수직과 수평 성분이 모두 있

Fig. 11. Spatial interlacing S3D display presenting an oblique line with disparity of 0. One of the red arrows can be the perceived binocular disparity.

Fig. 12. The stimulus for measuring the depth distortion in spatial interlacing.

지만, 깊이 지각에 큰 영향을 미치는 것은 수평 시차이다. 수직 시차는 주로 시야 전체에 있어서의 공간 파악을 하는 데에 사용되며 구체적인 깊이감을 지각하는 것은 수평 시차를 통해서이다. 따라서 어느 화살표를 사용하든 간에 수평 시차가 0이 아니므로 왜곡된 깊이를 지각하게 된다. 평균 후 할당법으로 양안 영상을 만들 경우 깊이 왜곡은 덜할 수 있으나 해상도 저하를 피할 수는 없다.

Fig. 13. The measured depth distortion in spatial interlacing.

그림 12는 공간 교차법에서의 깊이 왜곡 측정을 위해 사용한 자극이다. 정사각형의 테두리 가운데에 비스듬히 뺀 평행선이 세 개가 있다. 공간 교차법에서의 깊이 왜곡은 비스듬한 경사에서 나타나므로 수직 또는 수평의 직선으로 구성된 테두리에서는 깊이 왜곡이 없을 것이다. 피험자의 수행 과제는 가운데의 평행선이 테두리에 비해 앞 또는 뒤에 위치하는지를 구별하는 것이었다. 피험자의 반응을 토대로 깊이 왜곡을 상쇄하기 위해 필요한 시차를 찾아내었으며, 이를 깊이 왜곡의 크기로 추정하였다. 피험자는 표준 관찰 거리에서 실험을 수행하였다.

그림 13은 실험을 통해 측정된 공간 교차법에서의 깊이 왜곡을 보여준다. 가로축은 평행선의 수직으로부터 기울어진 각도, 세로축은 깊이 왜곡의 정도, 실선으로 이어진 점은 각 각도에서 추정된 깊이 왜곡, 각 점의 위아래로 뺀 선은 추정의 표준 편차를 나타낸다. 직접 할당법에서는 평행선의 경사가 수직에 가까울수록 깊이 왜곡의 크기가 작아지는 경향을 보인다. 평균 후 할당법에서 직접 할당법에 비해 깊이 왜곡이 훨씬 덜하다. 공간 교차법에서의 깊이 왜곡은 수직 방향의 화소 크기와 관련이 있는 것으로 평균 후 할당법을 사용하고 관찰 거리를 충분히 길게 하면 왜곡은 나타나지 않는다.

맺음말

하나의 디스플레이 장치로 양안식 입체 영상을 표시하는 방법에는 시간 교차법, 색 교차법, 공간 교차법 등이 있다. 하지만 이들은 모두 나름의 방식에 따라 두 눈의 영상 정보 사이에 시간적 또는 공간적 차이를 추가하게 된다. 이 차이가 양안 시차 지각에 영향을 미쳐, 결과적으로 관찰자가 지각하는 깊이를 왜곡하게 된다. 본 특집기사에서는 각 방식에서 나타나는 깊이 왜곡에 대한 이론적 설명과 실험을 통해 측정된 깊이 왜곡을 정리해보았다. 특히, 색 교차법에서 깊이 왜곡을 감소시킬 수 있는 가능성을 모색해 보았다. 본 연구진은 이 글이 양안식 입체 영상에서의 깊이 지각에 대한 이해를 넓히고 더 좋은 입체 영상 제작에 도움이 되기를 바란다.