

일반논문-09-14-5-09

스테레오 3D 영상 스케일링에 대한 기하학적 분석 및 anti-aliasing 필터

김 옥 중^{a)†}, 허 남 호^{b)}, 김 진 웅^{b)}

Geometric analysis and anti-aliasing filter for stereoscopic 3D image scaling

Wook-Joong Kim^{a)†}, Namho Hur^{b)}, and Jinwoong Kim^{b)}

요 약

최근 들어 다양한 스테레오 3D 디스플레이 장치의 출시가 활발히 이루어지면서 임의의 스테레오 3D 영상에 대한 효과적인 크기 변환 방법, 즉 스케일링(scaling) 방법에 대한 요구가 증가되고 있다. 그런데 CG 등을 통하여 생성된 경우와 같이 장면의 기하학적 정보를 완벽히 파악할 수 있는 경우를 제외하고는, 정확한 스테레오 3D 영상의 스케일링은 현실적으로 불가능하다. 이러한 제한으로 가장 널리 이용되는 방법은 좌우 영상에 대하여 적절한 2D 스케일링을 수행하고, 그 결과로 적절한 스테레오 3D 영상 스케일링이 발생하기를 기대하는 것이다. 본 논문에서는 2D 영상 스케일링을 통한 스테레오 3D 영상 스케일링에 있어서, 양안시(binocular vision) 모델에 근거한 기하학적 분석과 주파수 변화 분석을 제시한다. 기하학적 분석을 통해서 스테레오 3D 영상에서 발생 가능한 왜곡들에 대해서 설명하고, 주파수 변화 분석을 통해서 디지털 신호의 스케일링에 필수적으로 요구되는 aliasing 왜곡 방지 방법에 대해서도 제안한다. 제안된 방법은 주관적 화질 평가 결과 샘플링 이론(sampling theory)에만 근거한 필터링 방식에 비해 화질 왜곡을 더욱 효과적으로 억제할 수 있다는 것을 파악할 수 있었다. 따라서, 제안된 방법은 다양한 해상도를 지니는 3D 디스플레이 장치에서의 스테레오 3D 영상 재생에 효과적으로 이용될 것으로 기대된다.

Abstract

Image resizing (or scaling) is one of the most essential issues for the success of visual service because image data has to be adapted to the variety of display features. For 2D imaging, the image scaling is generally accomplished by 2D image re-sampling (i.e., up-/down-sampling). However, when it comes to stereoscopic 3D images, 2D re-sampling methods are inadequate because additional consideration on the third dimension of depth is not incorporated. Practically, stereoscopic 3D image scaling is process with left/right images, not stereoscopic 3D image itself, because the left/right images are only tangible data. In this paper, we analyze stereoscopic 3D image scaling from two aspects: geometrical deformation and frequency-domain aliasing. A number of 3D displays are available in the market and they have various screen dimensions. As we have more varieties of the displays, efficient stereoscopic 3D image scaling is becoming more emphasized. We present the recommendations for the 3D scaling from the geometric analysis and propose a disparity-adaptive filter for anti-aliasing which could occur during the image scaling process.

Keyword : 스테레오 3D 영상, 영상 스케일링, 3D 디스플레이, anti-aliasing

a) 한국과학기술원 전기 및 전자공학 전공
Div. EE, Dept. of ECE, KAIST.

b) 한국전자통신연구원 방송미디어연구본부
Broadcasting & Telecommunications Media Research Division, ETRI.

† 교신저자 : 김옥중(wjk@sdvision.kaist.ac.kr)

※ 본 연구는 교육과학기술부의 Top Brand Project 프로그램의 지원으로 수행되었습니다 [개인형 3DTV 기술 개발 2009, ETRI].

· 접수일(2009년7월20일), 수정일(2009년9월15일), 게재확정일(2009년9월24일)

1. 서론

스테레오 3D (stereoscopic 3D) 영상은 인간 뇌의 작용에 의하여 생성된 3차원 장면을 의미한다. 인간이 입체감을 느끼기 위해서는 다양한 방법들이 존재한다. 전통적으로는 정밀묘사 능력을 지닌 화가들이 개발해낸 상대적 크기, 텍스처 밝기 변화, 겹침 등을 이용하여 평면 2D 영상에서의 입체감 제공 방법이 존재하였다. 그런데 1830년대에 Charles Wheatstone에 의해 양안시 (binocular vision) 에 의한 입체감 인지 방법이 발견된 이후부터, 이 양안시차를 이용하는 방법이 널리 이용되게 되었다. 스테레오 3D 영상 관련 기기의 개발 역사는 2D 영상 시스템의 개발 역사와 거의 비슷하다. 다양한 입체 영상 서비스들이 개발되어 왔으며, 특히 1950년대에는 다수의 3D 영화들이 제작되기도 하였다. 하지만, 이러한 발전은 확장 진행되지 못하였고, 최근에 이르기 까지 스테레오 3D 영상은 매우 한정적인 분야에서만 이용되어 왔다. 그 결정적인 이유는 당시의 기술적 수준이 사용자들에게 편안하게 3D를 즐길 수 있도록 안정적인 화질을 제공하지 못했기 때문이다. 양안시에 의하여 3D 영상을 제공하기 위해서는 좌우 영상간에 존재하는 스테레오쌍 (stereo-pair)들 간에 세로축 변위(vertical disparity)가 없어야 하고, 가로축 변위(horizontal disparity)도 인간이 편안한 스테레오 인지에 요구되는 변위 범위인 안정 범위(comfort zone)으로 불리는 범위 내에서 형성되어야 한다. 하지만, 이전 세대의 기술은 이러한 문제들의 해결에 명확한 한계를 지니고 있었다^[1].

이러한 기술적 한계들은 최근의 디지털 영상 처리 기술의 발전에 힘입어 크게 개선되었고, 이를 통하여 안정적인 스테레오 3D 영상의 생성이 가능하게 되었다. 또한 CG 기술의 발전은 현실상에서는 불가능한 장면들의 생성을 가능케 하면서, 이러한 상상력의 실현이 스테레오 기술과 결합하여 스테레오 3D 영상에 대한 요구가 다시 증가될 수 있도록 하는 계기를 마련하였다. 특히 새로운 수입원을 찾고 있던 할리우드의 대형 영화 제작사들과 디스플레이 제작 업체들에게 스테레오 3D 영상은 새로운 기회 요소로 각광받게 되었다. 현재 시장에는 다양한 종류의 스테레오 3D 디스플레이 장치들이 출시되어 있으며, 특히 개인형 다시점 무

안경식 디스플레이 장비들이 큰 관심을 받고 있다. 이러한 활발한 개발은 디지털 처리 기술 뿐만 아니라, micro-optics 기술, LCD 기술, 그리고 계산 능력의 증가들이 복합적으로 결합된 결과이다. 그리고 특히 이 결과들은 스테레오 3D 디스플레이 장치의 가격 인하를 빠르게 하여 3D 디스플레이 장치의 파급을 확산 시키고 있다. 이러한 추세로 보면, 짧은 미래에 스테레오 3D 영상은 중요 멀티미디어 콘텐츠의 한 분야로 성장할 것이며, 단순 예능(entertainment) 분야 뿐만 아니라 교육, 연구, 의료 등의 분야로도 널리 확장되어 나갈 것이다^[2-4].

최근의 다양한 스테레오 3D 디스플레이 장치들의 출시는 스테레오 3D 영상의 크기 변환 문제에 대한 고민을 부각시켰다. 영상 크기 변환은 다양한 해상도를 가지는 디스플레이 장치에 적합하도록 원 영상의 크기를 변화시키는 것을 의미하는데, 이 기능은 특히 다양한 디스플레이 장치에서의 영상 데이터의 활용도를 높이는데 가장 필수적인 과정이다. 영상 크기 변환은 유클리디안 기하학 (Euclidean geometry) 에서 정의되는 스케일링(scaling) 변환으로 표현될 수 있다. 스케일링 변환은 임의의 스케일 계수 (scale factor) 에 따라 각 축 방향으로 물체를 확대하거나 축소하는 것을 의미하는데, 모든 축 방향으로의 스케일 계수들이 동일할 때 동일비율 스케일링 (uniform scaling) 이라고 하며 물체의 형태가 유지된 상태로 확대, 축소가 이루어진다. 기하학적 스케일링에 비해서 영상 스케일링은 추가적인 고려사항들이 존재한다. 왜냐하면 스케일링을 위해 단순히 영상내의 화소(pixel)들의 변환뿐만 아니라, 영상 내에 존재하는 내용 정보(context)에 발생할 수 있는 왜곡을 최소화하기 위한 고려가 병행되어야 하기 때문이다. 일반적인 2D 영상에 대한 스케일링은 이미 널리 알려진 문제로 대부분의 영상 처리 도구에서 쉽게 찾을 수 있는 가장 기본적인 기능 중 하나이다. 최근에는 영상 내에 존재하는 영역별 중요도에 따라 다른 비율로 스케일링을 수행하는 방법이 제안되기도 하였지만^[5], 일반적으로는 영상의 크기 축소에는 sub-sampling 과정을 수행하고, 크기 확장을 위해서는 보간 (interpolation) 방법을 수행한다. 그리고 샘플링 이론 (sampling theory)에 근거하여 영상의 스케일링 과정에서 발생할 수 있는 aliasing 왜곡을 방지하기 위해 적절한 LPF

(low-pass filter) 처리가 필요하다⁶⁾.

그런데 스테레오 3D 영상의 스케일링에 있어서는, 2D 영상의 경우에 비해서도 추가적인 고려가 필요하다. 그 원인은 이미 앞에서 기술한 바와 같이 스테레오 3D 영상은 좌우 영상을 이용하여 깊이감을 인간이 느낄 수 있도록 하기 때문에, 스테레오 3D 영상은 실체가 없는 데이터이기 때문이다. 2D 영상의 경우에는 디스플레이 화면상에 투영되는 영상 데이터와 실제 사용자가 인지하는 영상 정보가 동일하다. 따라서 화면상에 투영되는 영상 데이터에 대한 스케일링을 통하여, 인지되는 영상의 스케일링을 수행할 수 있다. 하지만 스테레오 3D 영상의 경우에는, 디스플레이 화면에 투영되는 영상 정보는 스테레오 3D 디스플레이 장치의 특성(예: lenticular 렌즈, parallax barrier, 편광 렌즈 등)에 적합하도록 혼합된 좌우 영상이다. 따라서 스테레오 3D 영상의 스케일링은 인간이 인지하는 영상 정보와 실제 조절 가능한 영상 정보간의 차이가 존재하고, 이러한 차이를 고려하여 수행되어야 하는 것이다.

만일 스테레오 3D 영상이 CG 와 같이 3차원 장면의 모든 기하학적 정보를 알 수 있는 상황이라면, 스테레오 3D 영상 스케일링은 기존의 기하학적 스케일링 형태로 비교적 쉽게 해결될 수 있다. 즉, 스케일 계수와 스테레오 3D 영상 재생 환경에 적합하도록 새로운 3D 장면을 구성하고, 그에 따라 좌우 영상을 생성하는 것이다. 하지만 이러한 접근은 비용적인 측면에서 큰 어려움을 지닌다. 예를 들어 스테레오 3D 영화를 여러 극장에서 상영하는 경우, 각 극장마다 스크린 크기 및 프로젝터 상황에 따라 각기 다른 필름이 배포해야만 최상의 3D 화질을 감상할 수 있다. 하지만 이러한 접근은 3D 영화의 상영 비용을 크게 증대시켜 현실적이지 못하게 된다. 또한 대부분의 스테레오 3D 영상이 실제 2개의 카메라를 이용하여 생성되고 있다는 현실적인 문제점도 존재한다. 실제 촬영된 영상으로부터 정확한 3D 기하학적 정보를 추출해 내는 것은 매우 어려우면서도 많은 계산량을 요구한다. 따라서, 스테레오 3D 영상 스케일링은 해상 데이터를 투영하는 환경의 근본적인 제한 때문에 좌우 영상에 대하여 2D 영상 스케일링을 각자 수행하고, 그 변환에 의하여 생성되는 스테레오 3D 영상이 원하는 스케일링 결과와 근접하도록 하는 것이 현실적으로 가능한 방법이다.

본 논문에서는 스테레오 3D 영상 스케일링에 있어서 좌우 영상을 이용하는 경우에 대한 기하학적 왜곡 관점과 주파수 스펙트럼 관점에서의 분석 결과를 제시한다. 이 문제는 오래 전부터 알려져 있던 하지만 그 현상 및 왜곡 최소화 관점에서의 분석은 진행되지 못하였다. 특히 3D 영화 제작에 있어서 목표로 하는 스크린 크기와 다른 스크린에서 3D 영화를 상영하는 경우, 눈으로 직접 확인하라는 조언 외에는 특별한 처리 방안이 제시되지 못한 상황이다. 따라서 본 논문에서는 우선 스테레오 3D 영상의 스케일링을 기하학적 관계식을 이용하여 분석해 보고, 발생 가능한 화질 저하 문제들에 대하여 구체적으로 제시한다. 그리고 둘째로 디지털 영상의 스케일링에 필수적으로 포함되는 anti-aliasing 처리 과정에 대하여 고려하고, 스테레오 3D 영상의 스케일링에 필요한 필터(filter)를 제안한다. 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2 장에서는 기하학적 관점에서 스테레오 3D 영상 스케일링을 분석하고, 이상적인 경우와 실제적인 경우에 대하여 비교 분석한다. 제 3 장에서는 주파수 스펙트럼의 변화 관점에서 분석하고, 변위 적응적인 (disparity adaptive) anti-aliasing 필터를 제안한다. 제 4 장에서는 제안 방식에 대하여 주관적 화질 평가 결과를 제시하고, 제 5 장에서 결론을 맺는다.

II. 스테레오 3D 영상 scaling 의 기하학적 분석

모든 스테레오 3D 디스플레이 장치는 깊이감 제공을 위하여 양안시를 주된 방법으로 이용하기 때문에, 이 과정에 대한 수치적 분석 연구가 많이 진행되어 왔다⁷⁻⁹⁾. 일반적으로 이상적인 디스플레이 스크린 상황(예: 광학적 회절 없음, 좌우 시각적 간섭(crosstalk) 없는 완벽한 좌우 영상 분리 등)을 가정한 상황에서 그림 1과 같은 모델이 널리 이용된다. 좌표계 (X, Y, Z) 의 원점이 그림과 같이 디스플레이 스크린의 중앙에 원점이 위치하도록 하였고, 스크린으로부터 V 만큼의 시청거리를 가지는 것으로 정의하였다. 그리고 본 좌표계에서 좌안과 우안의 좌표는 각각 $(-e/2, 0, -V)$ 과 $(e/2, 0, -V)$ 로 표현된다.

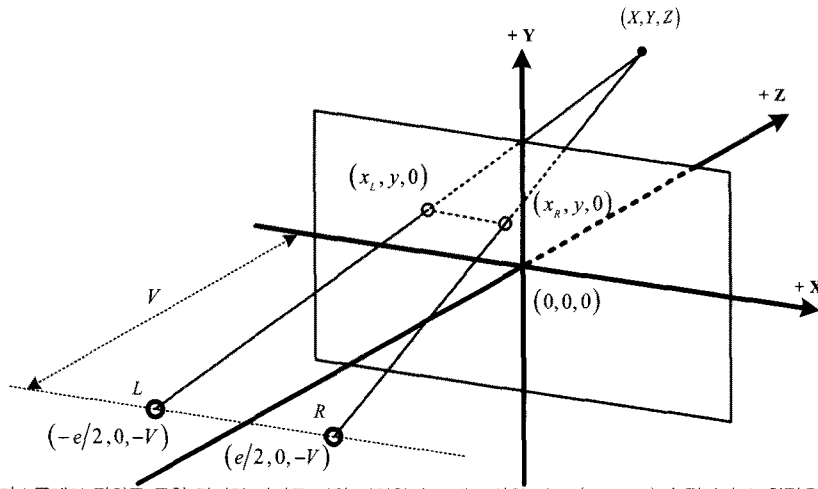


그림 1. 평면 스테레오 3D 디스플레이 장치를 통한 깊이감 인지를 위한 기하학적 모델. 3차원 좌표 (X, Y, Z) 가 정의되고, 원점은 디스플레이 스크린의 중앙에 위치하도록 설정되었음. 양안 간격, 좌안, 우안은 각각 e, L, R 로 정의되었고, 시청 거리는 V 로 정의되었음.
 Fig. 1. A geometric model of the binocular vision for a planar stereoscopic display

그림 1의 모델에서, 디스플레이 스크린 상에 투영되는 스테레오 쌍 $(x_l, y, 0)$ 과 $(x_r, y, 0)$ 이 존재한다고 할 때, 인지되는 스테레오 3D 화소 위치 (X, Y, Z) 는 삼각형의 비례관계에 의하여 다음과 같이 정의된다.

$$(X, Y, Z) = \left(\frac{ex_c}{2(e-d)}, \frac{ey}{e-d}, \frac{dV}{e-d} \right) \quad (1)$$

단, $x_c = x_l + x_r$ 그리고 변위 $d = x_r - x_l$ 이다. 그리고 표현의 편리를 위하여 식 (1)의 관계를 $(x_l, x_r, y, V) \leftrightarrow (X, Y, Z)$ 로 간단히 정의한다.

이제 스테레오 3D 영상 화소의 스케일링 변환을 고려한다. 3차원 좌표계에서 스케일링 변환은 아래의 식 (2)와 같이 표현된다. 이때 s_x, s_y, s_z 는 각 축에 대한 스케일 계수이고, (X', Y', Z') 는 (X, Y, Z) 에 대하여 스케일링 변환 후의 좌표이다.

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_x & & \\ & s_y & \\ & & s_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (2)$$

만일 스테레오 3D 영상이 CG와 같이 3차원 장면의 기하

학적 정보를 모두 알 수 있는 상황인 경우에는 식(2)에 의한 직접적인 스케일링 변환이 쉽게 가능하다. 하지만 그렇지 않은 경우에는 스테레오 3D 영상이 좌우 영상에 의하여 생성된 가상의 값이기 때문에 식 (2)와 같은 변환은 실질적으로 불가능하고, 디스플레이 스크린에 투영되는 좌우 영상을 이용해야만 한다. 다시 말하면, 두 개의 스테레오 3D 영상 화소의 좌표가 $(x_l, x_r, y, V) \leftrightarrow (X, Y, Z)$ 인 관계를 가진다고 할 때, 좌우 영상에 의한 스테레오 3D 영상의 스케일링 변환은 실질적으로 조절 가능한 (x_l, x_r, y, V) 를 이용해야만 하는 것이다.

이 문제는 특히 3D 영화의 극장 상영 시에 중요하게 고려되는 문제인데, 모든 극장의 스크린 크기가 동일하지 않기 때문에 극장에 배급된 영상은 각 극장의 스크린 크기에 맞추어서 비례적으로 변환이 이루어진다. 만일 이상적인 경우라면, 모든 극장의 스크린 크기 및 프로젝터 상황에 따라 각기 다른 필름이 배포되어야 한다. 하지만 이러한 배포 방식은 3D 영화의 상영 비용을 크게 증대시켜 현실적이지 못하다. 따라서, 스테레오 3D 영상 스케일링은 해상 데이터를 투영하는 환경의 근본적인 제한 때문에 좌우 영상에 대하여 2D 영상 스케일링을 각자 수행하고, 그 변환에 의하여 생성되는 스테레오 3D 영상이 원하는 스케일링 결과에 최대한 근접하도록 하는 것이 현실적으로 타당한 접근이다.

물론 좌우 영상을 이용한 스테레오 3D 영상 스케일링은 그 편리성과 함께 명확한 한계를 지닌다. 우선 좌우 영상간의 존재하는 변위에 대하여 최종 3D 장면을 고려하지 않고 2D 스테일링 변환을 하기 때문에 인간이 편안한 스테레오 인지에 요구되는 변위 범위를 벗어나는 경우가 발생할 수 있다. 또한 그 반대의 경우로 변위가 너무 감소하여 사용자가 원하는 크기만큼 깊이를 인지하지 못하게 되는 문제점도 지니게 된다. 실제 3D 영화를 제작하는 관점에서는 필히 눈으로 확인하라는 조언이 있을 만큼 좌우 영상의 스케일링을 통한 스테레오 3D 영상 스케일링은 전적으로 신뢰할 수는 없는 대안이라고 할 수 있다. 하지만 이 방법이 지니는 강력한 편리성과 대부분의 영상들이 CG가 아닌 실제 카메라를 통한 촬영을 통하여 생성되고 있는 현실적 상황에서, 본 논문에서 대상으로 하는 2D 영상 필터링을 통한 접근 방식은 왜곡 발생을 최소화하기 위한 피할 수 없는 선택이라고 할 수 있다.

좌우 영상 스케일링을 통한 스테레오 3D 영상 스케일링을 수식적으로 분석하면 다음과 같다. 임의의 스테레오 3D 화소가 $(x_L, x_R, y, V) \leftrightarrow (X, Y, Z)$ 의 관계를 통하여 형성되었다고 가정하자. 그러면, 좌우 영상에 대해 α_x 와 α_y 를 스케일 계수로 가지는 2D 스케일링을 수행하여

$$\begin{aligned} x'_L &= \alpha_x x_L \\ x'_R &= \alpha_x x_R \\ y' &= \alpha_y y \end{aligned}$$

시정거리 V' 을 가지는 3D디스플레이를 통해 생성된 스테레오 3D 화소 $(x'_L, x'_R, y', V') \leftrightarrow (X', Y', Z')$ 는 식(3)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} (X', Y', Z') &= \left(\frac{ex'_c}{2(e-d')}, \frac{ey'}{e-d'}, \frac{d'V'}{e-d'} \right) \\ &= \left(\frac{e\alpha_x x_c}{2(e-\alpha_x d)}, \frac{e\alpha_y y}{e-\alpha_x d}, \frac{\alpha_x dV'}{e-\alpha_x d} \right) \\ &= \left(\frac{\alpha_x(e-d)}{e-\alpha_x d} \cdot X, \frac{\alpha_y(e-d)}{e-\alpha_x d} \cdot Y, \frac{\alpha_x(e-d)}{e-\alpha_x d} \cdot \frac{V'}{V} \cdot Z \right) \end{aligned} \quad (3)$$

이 결과를 바탕으로 수식 (2)와 (3)을 비교하면,

$$s_x = \frac{\alpha_x(e-d)}{e-\alpha_x d}, s_y = \frac{\alpha_y(e-d)}{e-\alpha_y d}, s_z = \frac{\alpha_x(e-d)}{e-\alpha_x d} \cdot \frac{V'}{V} \quad (4)$$

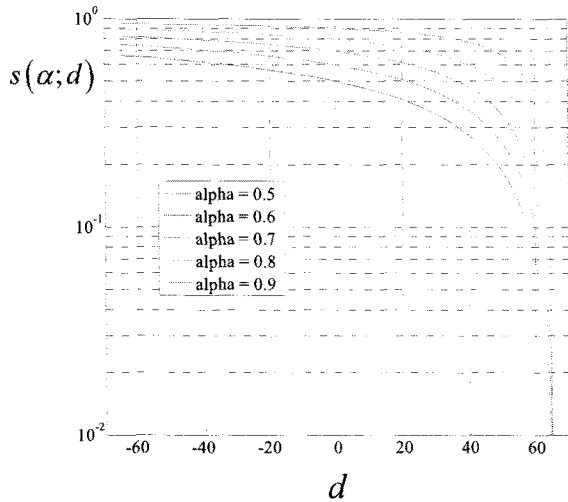
인 관계를 얻을 수 있다. 따라서 식 (4)의 특성을 분석하면, 좌우 영상 스케일링을 통한 스테레오 3D 영상 스케일링 방법의 한계 및 특징을 찾을 수 있다.

첫째로, 이상적인 3D 스케일링인 경우 모든 화소가 동일한 스케일링 변환을 하기 때문에 s_x, s_y, s_z 모두 상수이어야 한다. 그런데 식 (4)를 보면 $\alpha_x = \alpha_y = 1$ 인 경우에만 $s_x = s_y = 1$ 그리고 $s_z = V'/V$ 로 상수가 된다. 하지만 이 경우는 결국 아무런 스케일링 변환을 하지 않은 경우이기 때문에 의미를 가지지 않는다. 따라서 이때 내릴 수 있는 결론은, 스테레오 3D 영상 스케일링에서 모든 3D 화소들이 상수 스케일 계수를 가지도록 하는 좌우 영상 스케일링 방법은 존재하지 않는다는 것이다.

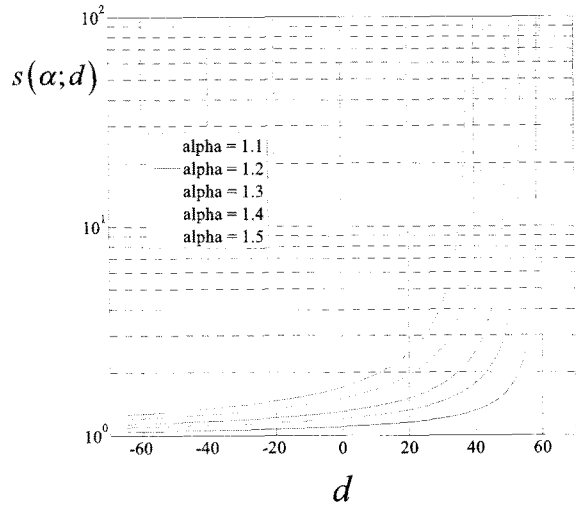
둘째로, 동일비율 스케일링 (uniform scaling)이 만족하기 위한 조건인 $s_x = s_y = s_z$ 를 위해서는 $\alpha_x = \alpha_y$ 이고 $V = V'$ 이어야 한다. 즉 스케일링 변환 이전과 이후의 시정거리가 동일한 경우에는 화소별 동일비율 스케일링을 만족시킬 수 있다. 하지만 이미 첫 번째 분석에서 제시한 바와 같이 모든 화소가 동일한 스케일 계수를 가지는 것은 현실적으로 불가능하기 때문에 동일비율 스케일링 특성은 각 화소에만 국한되게 된다.

세 번째 분석 결과는, 양의 변위 (positive disparity)를 가지는 스테레오 3D 화소가 음의 변위 (negative disparity)를 가지는 화소보다 크게 영향을 받는다는 점이다. 그림 2는

식 (4)에 공통적으로 포함되는 부분인 $s(\alpha; d) = \frac{\alpha(e-d)}{e-\alpha d}$ 의 변화 그래프이다. α 는 2D 스케일 계수이고, d 는 변위를 의미한다. 그림 2-(a)와 2-(b)는 $\alpha < 1$ 인 경우와 $\alpha > 1$ 인 경우에 대하여 변위 값을 $-e < d < e$ 범위에서 변화시켜 가면서 출력한 결과이다. 가로축은 d 값을 나타내고, 세로축은 log-scale 나타낸 $s(\alpha; d)$ 값을 나타낸다. $d = 0$ 인 경우에는 모든 α 값에 대하여 $s(\alpha; 0) = \alpha$ 을 만족한다. 그런데 그



(a) $\alpha < 1$ 인 경우의 $s(\alpha; d)$ 변화



(b) $\alpha > 1$ 인 경우의 $s(\alpha; d)$ 변화

그림 2. 좌우 영상 스케일 계수 α 에 대한 $s(\alpha; d)$ 의 변화 그래프. 가로축은 변위 d 값을 나타냄. 세로축은 log-scale 값임.
Fig. 2. Fig. 2. Variation curves of $s(\alpha; d)$ in terms of 2D scale factor α

그림 2-(a)에서, $d < 0$ 인 경우에는 $s > \alpha$ 의 값을 가지고 되고, $d > 0$ 인 경우에는 $s < \alpha$ 인 값을 가지게 된다. 그리고 그림 2-(b)의 경우에는 그 반대의 결과를 나타낸다. 즉 변위에 따라서 $s(\alpha; d)$ 와 α 값의 상대적 크기 변화가 발생한다. 이 결과는 우선 첫 번째 분석 결과에서 제시된 바와 같이 모든 경우에 동일한 3D 스케일 계수를 가지지 않는다는 점을 확인시켜준다. 따라서, 현실적으로 기대할 수 있는 최선의 결과는 결과는 임의의 α 에 대하여 $s(\alpha; d)$ 값의 변화 정도가 최소인 경우라고 할 수 있다. 즉, 그림 2-(a)와 2-(b)의 결과에서 $s(\alpha; d)$ 값의 변화 기울기가 완만한 경우가 결국 스테레오 3D 영상 스케일링의 결과에 대해서도 왜곡을 최소화할 수 있는 경우이다. 하지만 그림에서 쉽게 확인할 수 있듯이 $d > 0$ 인 양의 변위 영역에서 $s(\alpha; d)$ 의 변화 기울기가 $d < 0$ 인 음의 변위 영역에 비해서 확연히 커짐을 볼 수 있다. 따라서, 스테레오 3D 영상 스케일링에서 좌우 영상을 이용하는데 있어서, 양의 변위를 가지는 화소에서의 스케일링 변화가 더욱 심하게 발생함을 알 수 있다.

이상의 기하학적 분석 내용은 다음과 같이 정리될 수 있다. 좌우 영상을 이용한 스테레오 3D 영상 스케일링은 식

(2)와 같은 완벽한 3D 스케일링을 실현할 수는 없다. 하지만 변위 값이 크기 않은 경우 ($|d| \ll e$)에 대해서는 좌우 영상에 대해 스케일 계수 α_x, α_y 로 2D 스케일링을 수행하여도 $s_x \approx \alpha_x, s_y \approx \alpha_y$ 이 만족되는 결과를 얻을 수 있다. 또한 $V \approx V'$ 인 경우에는 추가적으로 $s_x \approx s_z \approx \alpha_x$ 인 결과도 얻을 수 있다. 그리고 양의 변위를 가지는 화소들의 경우에 있어서는 3D 영상 스케일링 결과가 2D 영상 스케일링에 적용한 스케일 계수 보다 큰 크기로 증가, 감소하는 특성을 가지고 있다. 따라서 이런 화소들에 대해서는 기하학적 왜곡을 최소화 하기 위한 적절한 처리가 요구된다. 예를 들어 일반적으로 양의 변위 영역은 배경에 포함되므로, 배경 영역을 적절히 자르기 (cropping) 하거나, blurring 과정 등을 통하여 스테레오 3D 인지에 발생하는 시각 피로도를 감소시키기 위한 노력이 필요하다.

III. 스테레오 3D 영상 scaling 을 위한 anti-aliasing 필터

본 절에서는 스테레오 3D 영상의 주파수 특성 분석을 통

하여, 스테레오 3D 영상 스케일링에서의 anti-aliasing 필터를 제안한다.

이산 신호의 re-sampling은 디지털 신호 처리 분야에서 매우 기본적인 문제이다. 1차원 이산 신호를 정수 스케일 계수 L 에 대한 up-sampling (1-to- L)을 수행하는 경우, 우선 각 샘플들 사이에 $L-1$ 개의 0 값 샘플들을 삽입하고, 그 다음 cutoff 주파수가 π/L 이고 크기가 L 인 LPF (low-pass filter)를 통과시킨다. 반대 경우인 down-sampling에 있어서는, 그 스케일 계수가 정수 M 이라고 할 때 (M -to-1), 우선 원신호에 대하여 cutoff 주파수가 π/M 인 LPF를 통과시키고, 그 다음으로 매 M 번째 샘플을 선택하는 과정을 통하여 수행된다. 이 두 re-sampling 경우에서 모두 볼 수 있듯이, 적절한 LPF 통과 과정은 re-sampling 과정에서 중요 기능을 하게 되는데, 그 역할은 sample rate의 변화에서 생길 수 있는 aliasing을 방지하기 위한 것이다. 그리고 이 LPF 통과 과정은 신호의 고주파수 성분을 감소시키는 역할을 하기 때문에, 불필요한 신호 정보의 감쇄 및 왜곡을 막기 위해서는 필요 이상의 고주파수 성분 감쇄를 일으키지 않는 적절한 cutoff 주파수가 선택되어야 한다^[10].

신호의 스케일링에 필요한 LPF의 cutoff 주파수를 효과적으로 결정하기 위해서는 대상 신호에 대한 주파수 특성 분석이 필수적으로 요구되고, 또한 그 분석하기 위해서는 Fourier 변환 과정이 요구된다. 일반적인 2D 영상의 경우에는 FFT 등의 다양한 방법이 존재하고, 또한 그 결과를 기반으로 많은 영상 처리 방법들이 제안되었다. 하지만, 스테레오 3D 영상에 있어서는, 2D 영상에 비해서 깊이 값이 추가되는 것뿐만 아니라, 각 화소 값들이 실질적으로 측정될 수 없는 가상의 값이기 때문에, 기존의 2D 영상과는 다른 접근 방식이 요구된다. 그리고 그 과정에 있어서는 실제 디스플레이 스크린에 투영되는 2D 영상 데이터뿐만 아니라, 인간이 스테레오 3D를 인지하는 과정에 대한 고려도 포함되어야 한다.

최근 들어 스테레오 3D 영상에 대한 주파수 특성 분석에 관한 연구가 진행되고 있다^[11-14]. 특히 참고문헌 [11]에서는 그림 1과 같은 인간의 양안시 모델을 기반으로 스테레오 3D 영상에 대한 주파수 분석 결과를 제안하였다. 제안된

결과에 의하면 스테레오 3D 영상의 밝기 값은 단순히 디스플레이 스크린에 투영되는 영상의 밝기 값에 의해서만 결정되는 것이 아니라, 좌우 영상간에 존재하는 변위 값에 의해서도 영향을 받는다는 점을 수식 및 실험을 통하여 제시하였다. 그 내용을 간략히 설명하면 다음과 같다. 그림 1의 스테레오 3D 영상 시청 환경에서, 좌측 눈에 투영되는 영상을 $I_l(c) = f(c)$ 라고 하고, 해당 영상에 존재하는 모든 화소들에 대한 변위 분포 함수를 $D(c) = (\delta_l(c), 0)$ 라고 하자. $c = (x, y)$ 는 디스플레이 스크린 상의 좌표를 나타낸다. 이 때 우측 눈에 투영되는 영상 I_r 은 좌측 영상과 변위 분포 함수를 이용하여 $I_r(c) = f(x + \delta_l(c), y)$ 로 표현될 수 있다. 임의의 스테레오 쌍 $c'_l = (x', y')$ 과 $c'_r = (x' + \delta', y')$ 로부터, 스테레오 3D 화소가 인지되고 그 위치가 (x, y, z_i) 라고 한다면, 식 (1)로부터 다음 관계가 만족한다.

$$(x, y, z_i) = \left(\frac{e(2x' + \delta')}{2(e - \delta')}, \frac{ey'}{e - \delta'}, \frac{\delta'V}{e - \delta'} \right) \quad (5)$$

그리고 식 (5)로부터

$$\begin{aligned} x' &= \frac{e - \delta'}{e} x_i - \frac{\delta'}{2} \frac{V}{z_i} x_i - \frac{\delta'}{2} \\ y' &= \frac{e - \delta'}{e} y_i = \frac{V}{z_i} y_i \end{aligned} \quad (6)$$

의 결과를 얻을 수 있다. 식 (6)의 결과는 스테레오 3D 화소로부터 그 화소를 구성하게 하는 좌우 화소들의 스크린에서의 위치를 의미한다.

위와 같은 관계를 바탕으로 좌우 영상 $f(c)$ 과 $f(x + \delta_l(c), y)$ 에 의하여 형성되는 스테레오 3D 영상 $I_{3D}(s)$ 을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$I_{3D}(s) = \begin{cases} f\left(\frac{V}{z}x - \frac{\Delta(s)}{2}, \frac{V}{z}y\right) & \text{if } z = \frac{\Delta(s)V}{e - \Delta(s)} \\ \phi & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (7)$$

단, $\Delta(s)$ 는 3D 위치 s 에 존재하는 화소를 형성하는 변위를 의미한다. 식(7)로부터 얻을 수 있는 중요 결과는 $I_{3D}(s)$ 가 $f(c)$ 의 변형된 형태로 표현이 가능하다는 점이다. 그리고 식(7)을 이용하면 스테레오 3D 영상인 $I_{3D}(s)$ 의 Fourier 변환 결과를 유추할 수 있다는 것이다. 일단 계산의 편리를 위하여 영상내의 모든 변위값이 상수 p 로 일정하다고 가정하면 (즉, $\Delta(s)=p$), $I_{3D}(s)$ 의 Fourier 변환 $FT\{I_{3D}(s)\}$ 를 다음과 같이 표현 가능하다.

$$\begin{aligned}
 FT\{I_{3D}(s)\} &= \iiint_{x,y,z} I_{3D}(s) e^{-j[\omega_x x + \omega_y y + \omega_z z]} dx dy dz \\
 &= e^{-j\omega_z z_0} \cdot FT\left\{f\left(\frac{V}{z_0}x - \frac{p}{2}, \frac{V}{z_0}y\right)\right\} \\
 &= \left(\frac{z_0}{V}\right)^2 F\left(\frac{z_0}{V}\omega_x, \frac{z_0}{V}\omega_y\right) e^{-j\left(\frac{p z_0}{2V}\omega_x + z_0 \omega_z\right)},
 \end{aligned} \tag{8}$$

여기서, $F(\omega_x, \omega_y)$ 는 $f(x, y)$ 의 Fourier 변환을 의미하고, $z_0 = V \frac{e}{e-p}$ 이다. 그리고 ω_x 과 ω_y 는 2π 범위를 가지는 정규화된 주파수 (normalized frequency)이다. 참고문헌 [11]에 나와있듯이, 식 (8)로부터 주파수 성분 ω_x 과 ω_y 가 z_0/V 만큼 비율에 따라 변화하게 된다는 점을 확인 할 수 있다. 이러한 주파수 비율 변화는 결과적으로 스테레오 3D 영상 $I_{3D}(s)$ 의 Fourier 변환 결과는 $F(\omega_x, \omega_y)$ 의 결과를 p 의 크기와 방향에 따라 확장 또는 축소시킨 형태로 표현이 된다는 것을 의미한다. 그리고 p 가 음의 변위 ($p < 0$)인 경우에는 주파수 스펙트럼의 확장 현상이 발생하여, 이는 결국 aliasing 현상을 일으켜 화질 왜곡의 원인이 될 수 있다는 것이다.

이 결과는 본 논문에서 다루고 있는 스테레오 3D 영상 스케일링에서의 anti-aliasing 필터를 설계하는데 주요하게 이용된다. 스테레오 3D 영상의 스펙트럼 대역 (bandwidth)가 변위값에 의해서 변화된다는 점은 결국 좌우 영상의 스케일링에 필요한 anti-aliasing 필터를 설계하는데 있어서도 단순히 스케일 계수에 의해서만 결정되는 것이 아니라 변

위에 대해서도 고려가 되어야 한다는 점을 의미하게 된다. 따라서, 앞에서 설명한 바와 같이 만일 $p < 0$ 인 경우, 그리고 스케일 계수가 M 인 경우의 스테레오 3D 영상의 스케일링에 있어서는 좌우 영상 스케일링시 사용되는 LPF의 통과 대역은 1차원 신호에서와 같이 단순히 스케일 계수에 의한 $|\omega_{x,y}| \leq \frac{\pi}{M}$ 이 아니라, 변위를 고려하여

$$\begin{cases} |\omega_{x,y}| \leq \frac{e}{e+|p|} \frac{\pi}{M} & \text{if } p < 0 \\ |\omega_{x,y}| \leq \frac{\pi}{M} & \text{if } p \geq 0 \end{cases} \tag{9}$$

로 결정되어야 하는 것이다.

식 (9)의 결과는 영상 전체의 변위가 일정하다는 가정으로부터 유도한 결과이다. 하지만 대부분의 경우 다양한 변위값을 가지기 때문에, 식 (9)를 유도한 가정과는 차이를 가진다. 하지만 식 (9)와 같은 통과 대역을 가지는 LPF 처리는 다양한 변위를 가지는 경우에도 여전히 효과적으로 이용될 수 있다. 일반적으로 영상에 적용되는 필터는 FIR (finite-impulse-response) 형태를 지니게 된다. 좌우 영상 내 화소들이 모두 동일한 변위를 가지는 경우는 매우 드물지만, 충분히 작은 영역에서는 동일한 변위를 가진다고 가정할 수 있다. 특히 FIR 필터의 region-of-support와 같이 수 화소 만큼 정도의 크기를 지니는 작은 영역에 대해서는 동일비율 스케일링 가정이 만족된다고 가정할 수 있다. 따라서 좌우 영상의 스케일링을 통한 스테레오 3D 영상 스케일링에 있어서, 각 화소별로 변위를 구하고 그 변위 값에 따라 식(9)를 이용하여 적응적으로 필터링을 수행하게 되면, 스테레오 3D 영상 스케일링 변환 후에 형성되는 스테레오 3D 영상에서 발생 가능한 aliasing 왜곡을 효과적으로 억제할 수 있다.

IV. 주관적 화질 평가

좌우 영상 스케일링을 통한 스테레오 3D 영상 스케일링의 특성 파악을 위하여 제 2 장과 제 3 장에서 기하학적인

분석과 주파수 스펙트럼의 변화에 대한 분석을 제시하였다. 기하학적 분석의 경우에 있어서, 좌우 영상간의 시차가 스테레오 영상 형성을 위한 시각적 안정 영역 내에 존재하는 경우 식(4)의 관계를 충분한 신뢰도를 가지고 만족시킬 것으로 예상할 수 있다. 하지만 만일 2D 영상 스케일링에 의해 변화된 시차가 안정 영역에서 벗어나는 경우에는 인간이 3D 장면을 인지할 수 없거나, 혹은 인지를 하더라도 시각적 불편함을 느끼게 될 가능성이 매우 높다. 따라서 스테레오 3D 스케일링에서의 기하학적 변화에 대한 주관적 화질 평가는 평가자가 3D 장면을 인지하는지, 또는 동일 장면을 장시간 시청할 때 시각적인 피로도를 느끼는 지에 대한 평가에 한정된다. 그런데 이러한 시각적 불편함을 해소할 수 있는 근본적인 해결책은 잘 알려진 바와 같이 3D 장면에 대한 모든 기하학적 정보를 추출하거나, 아니면 3D 장면 자체를 CG 를 통하여 생성하는 경우이다. 따라서 본 논문의 대상인 좌우 영상의 스케일링에 의한 스테레오 3D 영상 스케일링에서 기하학적 변화에 대한 주관적 평가는 단순히 스테레오 생성이 안정적이었는지, 아니면 시각적으로 피로감을 유발시켰는지에 대한 확인 외에는 의미를 가지기 어렵다 따라서 본 주관적 화질 평가에서는 본 논문에서 제안하는 스테레오 3D 영상 스케일링을 위한 anti-aliasing 필터의 성능 확인에 한정하여 평가를 수행하였다.

그림 2-(a) 와 2-(b)에서 볼 있듯이 $V=V'$ 이고, 2D 스케일 계수인 α_x, α_y 의 값이 동일하며 1 근처의 값을 가지는 경우 ($\alpha_x = \alpha_y \approx 1$)에는 $s_x = s_y = s_z \approx \alpha_x$ 인 관계가 성립하

며, 이 관계는 안정 영역의 범위를 벗어나지 않는 신뢰할 수 있는 경우이다. 따라서 본 주관적 화질 평가 실험에서는 2D 스케일 계수의 값을 0.8인 경우와 1.2 인 경우에 대하여 실험을 수행하였다. 기존의 2D 영상 주관적 화질 평가와는 다르게, 스테레오 3D 영상의 주관적 화질 평가는 디스플레이 스크린에 투영되는 좌우 영상 뿐만 아니라, 평가자의 경험, 스테레오 3D 인지 능력, 조명, 3D 디스플레이의 시각적 간섭 정도 등 다양한 요소로부터 영향을 받는다. 본 논문에서 대상으로 하는 스테레오 3D 영상 스케일링에서의 anti-aliasing 필터 성능 평가를 위해서는 평가자들이 aliasing 영향에 대해서만 집중할 수 있도록 하는 것이 필요하다. 따라서 본 실험에는 15명의 평가자가 참여했는데, 모두 영상 처리에 대한 전문적인 지식을 가진 분들로 선정을 하였고, 또한 평가에 있어서 anti-aliasing 의 영향을 직접적으로 받는 화면 앞으로 튀어나와 보이는 영역 (crossed disparity 영역)의 화질을 중요 평가 기준으로 삼아달라는 요구를 하였다.

실험에서는 그림 3의 영상을 이용하였다. 그림 3-(a)는 CG 로 제작된 것으로 중앙의 탁자 부분이 영변위 (zero-disparity) 부분이고, 우측 첫 번째 기둥과 청색 공은 음의 변위를, 그리고 항아리와 바위는 양의 변위를 지닌다. 그리고 그림 3-(b) 와 3-(c)는 평행 스테레오 카메라를 이용하여 생성된 것이다. 스테레오 3D 영상의 재생을 위해서는 19인치 lenticular 방식 무안경 모니터^[15]를 사용하였다. 그리고 주관적 화질 평가 방식에는 변형된 Degradation Category Rating (DCR)^[16] 방식을 사용하였다. 보다 자세하게 설명

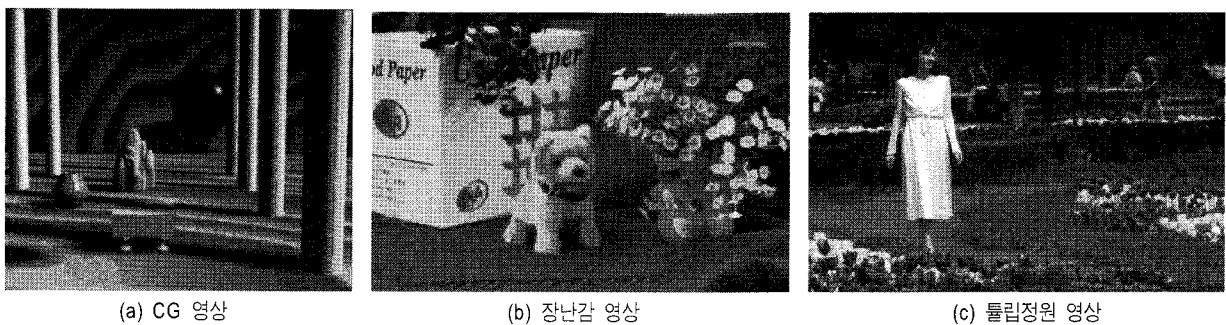


그림 3. 주관적 화질 평가에 이용된 실험 영상들. 그림 (a)는 CG 로 생성된 영상으로 탁자 부분이 zero-disparity 를 지니며, 청색 공과 오른쪽 첫 번째 기둥이 음의 변위를 가진다. 그림 (b)와 (c)는 평행 스테레오 카메라를 통하여 획득된 것으로 모든 물체들이 음의 변위를 가진다.

Fig. 3. Test images for the subject viewing

하면, 평가자는 2개의 영상을 평가하게 되는데, 첫 번째 스테레오 3D 영상은 일반적인 2D 스케일링 방식에 의하여 크기 변형된 경우이고, 두 번째 영상은 제안된 anti-aliasing 필터를 이용한 영상이다. 평가자는 처음 5초간 첫 번째 영상을 시청하고, 2초간의 회색의 영상을 본 후에, 다시 5초간 두 번째 영상을 시청하게 된다. 그리고 10초간의 평가 시간 동안 첫 번째 영상에 대한 두 번째 영상의 상대적인 화질을 5단계(5:아주 좋음; 4: 좋음; 3:동일; 2: 나쁨; 1: 아주 나쁨)로 평가를 한다. 즉, 제안 방식에 의하여 처리된 스테레오 3D 영상의 화질이 우수할수록 높은 점수를 받게 된다.

그림 4 는 주관적 화질 평가 결과를 나타낸다. 그림 3-(a) 영상과 3-(b) 영상의 경우에서 스케일 계수 0.8 과 1.2 로 변환이 이루어진 경우 모두에 대해서 대부분 ‘동일’이라는 평가를 하였다. 이는 아마도 음의 변위를 가지는 영역의 텍스처 변화가 비교적 평탄하기 때문에 제안된 변위 적응적 필터와 일반적인 크기 변화 필터 효과에 시각적 차이가 거의 발생하지 않았기 때문으로 분석할 수 있다. 하지만 그림 3-(c)의 영상에 있어서는, 약 60% 정도의 평가자가 제안 방식에 의한 필터링이 좋은 시각적 결과를 나타낸 것으로 평가하였다. 그 이유는 영상 전면의 꽃밭 부분이 고주파 성분을 많이 포함하고 있고, 제안된 필터링에 의해 aliasing이 감소되었기 때문이라고 판단할 수 있다. 비록 본 실험이 평

가자 및 실험 영상의 수에서 부족한 면이 있지만, 실험을 통해서도 본 논문에서 제안한 변위 적응적인 anti-aliasing 필터가 스테레오 3D 영상 스케일링에 있어서 발생할 수 있는 aliasing 영향을 줄여주어 시각적 개선 효과가 있다는 사실을 확인할 수는 있었다.

V. 결론

스테레오 3D 영상은 인간의 인지 기능을 이용하기 때문에, 스테레오 3D 영상 자체에 대한 직접적인 스케일링은 현실적으로 가능하지 않다. 하지만 최근 들어 다양한 스테레오 3D 디스플레이 장치의 출시가 활발히 이루어지면서 임의의 스테레오 3D 영상에 대한 효과적인 크기 변환 방법, 즉 스케일링 방법에 대한 요구가 증가되고 있다. 일반적으로 장면에 대한 정확한 3D 기하학적 정보가 알려진 경우에는, 3D 디스플레이 장치의 특성에 따라 스테레오 카메라 위치를 적절히 재구성하여 원하는 스케일링 결과를 얻을 수 있다. 하지만, 실제 카메라를 통하여 획득한 영상의 경우에는 정확한 3D 정보를 획득하는 것은 복잡한 계산을 요구할 뿐만 아니라, 그 정확도에 있어서 만족할 만한 결과를 얻는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 이러한 현실적 한계로 인해 실질적으로 가장 널리 이용되는 방법은 좌우 영상에 대하여 적절한 스케일 계수에 의한 2D 영상 스케일링을 수행하고, 그 결과로 인하여 수용할 만한 스테레오 3D 영상 스케일링이 발생하기를 기대하는 것이다. 이러한 방법은 그 편리성 때문에 가장 널리 이용되기는 하지만, 기하학적 관점과 주파수 변화 관점에서의 충분한 분석이 제시되지 못하였었다.

본 논문에서는 2D 영상 스케일링을 통한 스테레오 3D 영상 스케일링에 있어서, 양안시 모델을 이용하여 기하학적 분석과 주파수 변화 분석을 진행하였다. 첫 번째 기하학적 분석 결과, 스케일링 이전과 이후의 시청 거리가 동일한 경우, 화소 단위로 동일한 스케일 계수를 가지는 스테레오 3D 영상 스케일링이 가능하다는 것을 분석할 수 있었고, 2D 영상 스케일 계수가 1 근처일 경우는 스테레오 3D 영상 스케일링 결과도 원하는 결과에 매우 근접한다는 점도 확

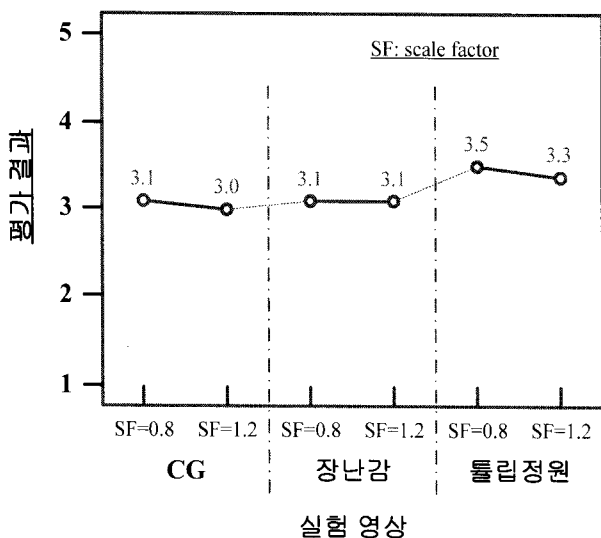


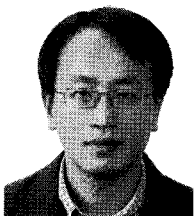
그림 4. 주관적 화질 평가 결과
Fig. 4. Results from the subject viewing

인할 수 있었다. 둘째 주파수 변화 분석 관점에서는 변위에 따라서 영상의 스펙트럼이 변화하는 특성이 있으므로, 스케일링 변환 후 발생할 수 있는 **aliasing** 왜곡을 억제 하기 위해서는 기존의 샘플링 이론에만 근거한 필터링이 아니라, 변위 값에 적응적인 필터링이 필요하다는 것을 제시하였다. 그리고 이를 만족시키는 필터링 방법에 대해서도 제안하였고, 주관적 화질 평가 실험을 통하여 개선 결과를 확인하였다. 스테레오 3D 영상의 효과적인 이용을 위해서는 그 특성을 이용한 다양한 처리 방법들이 개발되어야 한다. 하지만 이미 널리 알려진 방법들은 2D 영상을 위해서 개발된 것들이 대부분이기 때문에 스테레오 3D 영상에 적합하도록 추가적인 연구가 필요하다. 본 논문에서 제안된 결과는 향후 스테레오 3D 영상의 화질 개선 등에 효과적으로 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] Bernard Mendiburu, "3D Movie Making," Focal Press, 2009.
- [2] P. Benzie, J. Watson, P. Surman, I. Rakkolainen, K. Hopf, H. Urey, V. Sainov, C. Kopylow, "A survey of 3DTV displays: techniques and technologies," IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol., vol. 17, no. 11, Nov. 2007, pp1647-1658.
- [3] H. M. Ozaktas, L. Onural (Eds.), "Three-Dimensional Television," Springer, 2008.
- [4] 김옥중, 김진웅, 국내에서의 3DTV 관련 기술 개발 역사 및 현재 동향 분석, 방송공학회지 제 12권 제4호, 2007년 12월, 40-52페이지
- [5] Avidan, S., Shamir, A., "seam carving for content-aware image re-sizing," SIGGRAPH 2007.
- [6] T. Lehmann, C. Gonner, K. Spitzer, "Survey: Interpolation Methods in Medical Image Processing," IEEE trans. on Medical Imaging, vol. 18, no. 11, Nov. 1999, pp1049-1075.
- [7] A. Woods, T. Docherty, R. Kock, "Image distortions in stereoscopic video systems," in Proc. SPIE vol. 1915: Stereoscopic Displays and Applications IV, Feb. 1993.
- [8] B. Froner, N.S. Holliman, "Implementating an Improved Stereoscopic Camera Model," in Proc. Eurographics Theory and Practice of Computer Graphics 2005, June 2005.
- [9] H. Yamanoue, M. Okui, F. Okano, "Geometrical analysis of puppet-theater and cardboard effects in stereoscopic HDTV images," IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol., vol. 16, no. 6, June 2006, pp744-752.
- [10] A. Oppenheim, R. Schaffer, Discrete-Time Signal Processing, Prentice Hall, 1989.
- [11] Wook-Joong Kim, Jinwoong Kim, "Disparity adaptive filter for anti-aliasing of stereoscopic 3D images," Proc. of IEEE 3DTV-Conference 2008, The True Vision: capture, transmission, and display of 3D video, 28-30 May 2008, Istanbul, Turkey.
- [12] C. Moller, A. Travis, "Correcting Interperspective aliasing in autostereoscopic displays," IEEE Trans. on Vis. Comput. Graphics, vol. 11, no. 2, March/April 2005, pp228-236.
- [13] J. Konrad, P. Agniel, "Subsampling models and anti-alias filters for 3-D automultiscopic displays," IEEE Trans. Image Process., vol. 15, no. 1, Jan. 2006, pp128-140.
- [14] M. Zwicker, A. Vetro, S. Yea, W. Matusik, H. Pfister, F. Durand, "Resampling, Antialiasing, and Compression in Multiview 3-D Displays," IEEE Signal Process. Mag., vol. 24, no. 6, Nov. 2007, pp88-96.
- [15] <http://www.miracube.net/product/>
- [16] ITU-R BT.500-11 Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures.

저 자 소 개



김 옥 중

- 1993년 2월 : KAIST 전기 및 전자공학 학사
- 1995년 2월 : KAIST 전기 및 전자공학 석사
- 1999년 8월 : KAIST 전기 및 전자공학 박사
- 2005년 12월 ~ 2006년 11월 : Michigan State Univ., Visiting Scholar
- 1999년 12월 ~ 2007년 9월 : 한국전자통신연구원 전파방송연구단 선임연구원
- 2007년 10월 ~ 현재 : KAIST 전기 및 전자공학 전공 연구교수
- 관심분야 : 스테레오 3D 영상 처리, AV coding

저 자 소 개



허 남 호

- 1992년 2월 : POSTECH 전자전기공학 학사
- 1994년 2월 : POSTECH 전자전기공학 석사
- 2000년 2월 : POSTECH 전자전기공학 박사
- 2000년 4월 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 실감방송시스템연구팀장
- 2005년 9월 ~ 현재 : UST 이동통신 및 디지털방송공학 겸임교수
- 2003년 10월 ~ 2004년 9월 : Communications Research Centre Canada, Research Scientist
- 주관심분야 : 3DTV, 3D DMB



김 진 응

- 1981년 2월 : 서울대학교 전기공학과 학사
- 1983년 2월 : 서울대학교 대학원 전기공학과 석사
- 1993년 7월 : 미국 Texas A&M 대학교 전기공학과 박사
- 1983년 3월 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 방통미디어연구본부 책임연구원
- 주관심분야 : 디지털 방송, 3DTV, AV Coding, Image processing