

집적결상된 3차원 영상의 중복 및 누락 왜곡에 대한 연구

서장일 · 차성도 · 신승호[†]

강원대학교 물리학과

Ⓣ200-701 강원도 춘천시 효자 2동 192-1

(2004년 4월 8일 받음, 2004년 5월 27일 수정본 받음)

집적결상법으로 3차원 영상을 재생하는 경우 재생영상의 일부분이 중복 또는 누락되는 왜곡현상이 나타난다. 본 논문에서는 이러한 왜곡현상의 원인을 분석하고 정량적 해석을 시도하였다. 집적결상에서 사용 가능한 몇 가지 기본적인 변수들을 도입하여 왜곡을 정량화하고 최소화될 조건을 조사하였으며, 그 특성을 실험을 통해 확인하였다.

주제어 : Three-dimensional image processing, Image reconstruction techniques, Image analysis, Image formation theory

I. 서 론

3차원 영상을 재생하기 위한 집적결상법(integral imaging)은 Lippmann에 의해 처음으로 고안되었다.^[1] 집적결상법은 3차원 물체의 영상정보를 렌즈어레이(lens array)를 이용하여 작은 2차원 영상(기본영상) 배열의 형태로 픽업하고, 다시 이 2차원영상들을 픽업에 사용되었던 렌즈어레이로 원래의 물체와 같은 3차원 영상으로 재생하는 방법이다. 이 집적결상법은 렌티큘라(lenticular)방식^[2,3]과 비교할 때 연속적인 시야를 가지며 재생 판넬에 대해 수평 방향으로 뿐만 아니라 수직 방향으로도 시각차를 발생시킬 수 있고, 영상을 보기 위해 특별한 안경이 필요 없기 때문에 현재 3차원 TV나 비디오 시스템과 관련하여 활발히 연구되고 있다.^[4-6] 그러나 집적결상법은 기본영상(elemental image)의 해상도 문제^[7,9]나 시야각 문제,^[10,11] 깊이감 문제^[12-14] 등에 의해 고화질의 실시간 영상을 재생하는데 현실적인 어려움을 가지고 있다. 뿐만 아니라, 기본렌즈(elemental lens)의 개수나 크기, 기본렌즈와 기본영상 사이의 거리 등의 최적 조건을 구하는 것 또한 질 좋은 3차원 영상을 얻기 위해 해결해야 할 중요한 문제들이다.^[15,16] 이와 같은 문제들을 해결하기 위해서는 집적결상과 관련되는 고유한 변수들에 대한 이해가 필수적으로 요구된다.

완벽한 3차원 영상의 재생을 위해서는 각 기본 렌즈 뒤에 결상되는 기본영상은 각기 입체적인 상이어야 하고, 재생시에도 기본영상이 완전히 대칭되는 입체적인 상이어야 한다. 그러나 결맞음성이 없는 빛에 의한 영상을 저장할 때, 영상 정보의 형태는 CCD(charge-coupled device) 어레이(array)등과 같은 픽업(pick-up)장치에 의해 평면적인(2차원적인) 정보의 형태를 취하므로 여러 왜곡이 나타나게 된다. 특히 적은 개수의 기본렌즈로 구성된 렌즈어레이를 사용할 경우, 집적 영상이 중복 또는 누락되는 현상이 두드러진다. 본 논문에서

는 이와 같이 재생영상이 중복 및 누락되는 현상의 원인을 자세히 분석하고 기본적인 변수들에 따른 중복 및 누락의 정도를 정량화하였다. 그리고 일반적인 경우에 대해 왜곡이 최소화되는 조건을 찾고, 몇 가지 변수들에 따른 특성을 실험을 통해 확인하였다.

II. 집적결상에서 양안시차와 재생상의 왜곡

사람이 느끼는 입체감은 두 눈의 시각 차이에 의해 인식된다. 각 눈의 위치에서 보여야 할 2차원 영상정보가 손실 없이 각각 두 눈에 완벽히 분리되어 보인다면 왜곡 없는 3차원 영상으로 인식된다. 그러나 집적 결상법에서 기본영상이 결상되는 면의 위치에 따라 두 눈에 완전히 분리되지 못하거나 일부분이 보는 각도에 따라 표현되지 못하는 손실이 나타난다. 그림 1은 재생영상 영역에서 두 눈의 위치에 따라 중복 및 누락되는 영역을 세분한 그림이다. 그림 1(a)에서 보는 바와 같이 I위치에 표현된 점은 렌즈 1에 해당하는 기본 영상의 결상면상의 점 A와 렌즈 2에 해당하는 기본 영상의 결상면상의 점 B에 의해 인식된다. 이때 점 A는 오른쪽 눈에도 공유되어 보이기 때문에 입체적 위치의 점 I와 기본영상의 결상면 상의 점 A, 두 개의 점으로 중복되어 보인다. 그리고 그림 1(b)와 같이 영역 3의 점 I는 I위치, A위치, 그리고 B위치에 각 3개의 점으로 중복되고, 영역 0에는 표현될 수 없으며, 영역 1만이 입체적 위치에 하나의 점만으로 표현된다. 마찬가지로 집적영상을 실상으로 재생할 때도 그림 1(c)와 같이 재생영상 영역에서 중복 및 누락되는 영역이 나타나는 것을 알 수 있다. 이와 같이 기본영상의 결상면의 위치와 기본 렌즈 크기에 따라 재생 영역에서 중복되거나 누락(표현될 수 없는 영역)되는 현상이 생기는 것을 알 수 있다.

점 물체를 픽업하고 도치영상(pseudoscopic image)으로 재생하는 과정은 그림 2와 같이 픽업시 초점이 맞았던 면과 대칭되는 위치에 기본 영상의 결상면이 놓이고, 결상된 각각의

[†]E-mail: shinsh@kangwon.ac.kr

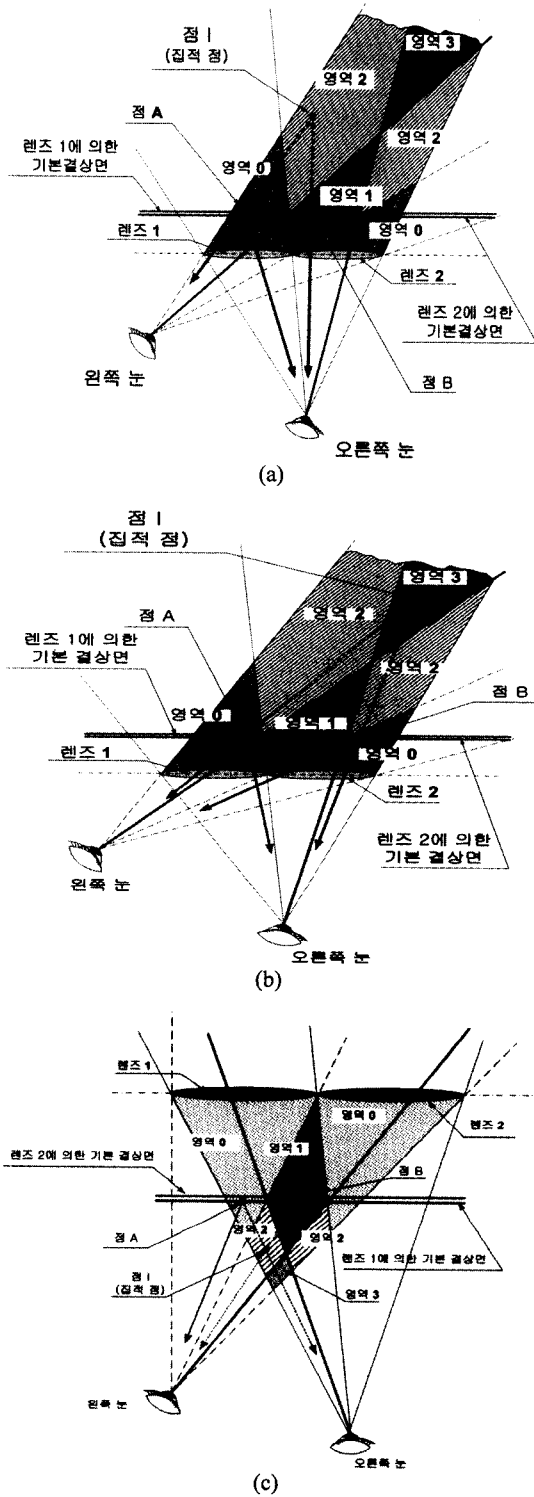


그림 1. 집적 결상법에서 양안시차에 근거한 재생영역 분류. 집적영상을 허상으로 재생할 때, (a) 영역 2에 있는 집적점에 대한 중복, 누락영역, (b) 영역 3에 있는 집적점에 대한 중복, (c) 실상으로 재생할 때의 중복, 누락 영역.

기본 점 영상의 결상점을 볼 수 있는 영역들을 표현할 수 있다. 그림 2(a)는 픽업시 초점이 맞았던 면보다 렌즈어레이로

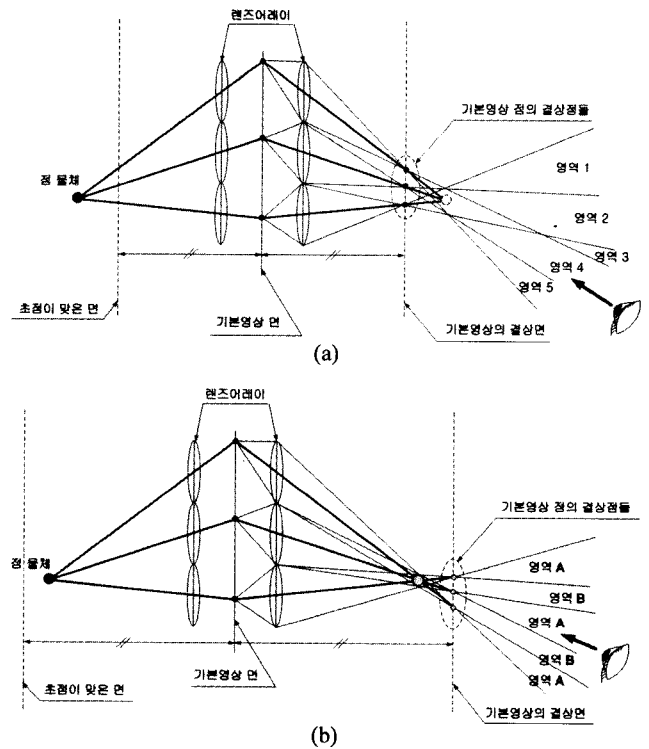


그림 2. 필름픽업 방법에 의한 도치집적영상 재생 시 관찰자 위치에서의 중복과 누락영역. (a) 기본영상 픽업시 초점이 맞은 면보다 렌즈어레이로부터 멀리 있는 점 물체, (b) 기본영상 픽업시 초점이 맞은 면보다 렌즈어레이로부터 가까이 있는 점 물체.

부터 멀리 떨어져 있는 점 물체의 경우에 해당한다. 이 경우 보는 위치에 대해 영역 1, 3, 5는 점 영상의 결상점들 중 하나의 점만 보이는 영역이고, 영역 2, 4는 두 개의 점이 보이는 영역이며 영역 3은 세 개의 점들이 보이는 영역이 된다. 각 눈이 영역 1, 3, 5 중 다른 영역에 각각 위치하고 있다면 입체적 위치에 하나의 점만이 보일 것이다. 이때 입체적 위치는 재생되어야 할 위치에 항상 정확히 위치하는 것은 아니며, 재생되는 입체적 점은 각 영역 상에서 두 눈의 위치에 따라 변하게 된다. 이것은 셔터 글래스(shutter glass)나 편광 안경에 의한 스테레오스코픽(steroscopic) 영상에서 나타나는 것과 유사하다.^{[17],[18]} 그리고 한쪽 눈은 영역 1, 3, 5 중 하나의 영역에 위치하고, 다른 한쪽 눈은 영역 2, 4 중 하나의 영역에 위치한다면, 입체적 위치에 하나의 재생 점과 기본영상의 결상면 상의 하나의 점, 즉 두개의 점으로 중복되어 보인다. 그리고 각 눈이 영역 2, 4에 나누어 위치한다면 입체적 위치에 하나와 기본영상의 결상면 상의 2개의 점, 즉 3개의 점으로 중복되어 보이게 된다. 그림 2(b)는 픽업시 초점이 맞았던 면보다 렌즈어레이로부터 가까운 곳에 점 물체가 있을 경우이다. 이때도 보는 위치에 따라 영역 A는 기본영상의 결상면 상의 점들 중 하나의 점만 보이는 영역이고, 영역 B는 그 점이 보이지 않는 영역에 해당한다. 이때, 각 눈

이 다른 영역 A에 각각 위치하고 있으면 입체적 위치에 집적점으로 하나만 보이게 되고, 한쪽 눈은 영역 A, 다른 한쪽 눈은 영역 B에 위치하면 재생점의 입체적 위치를 알 수 없으며, 각 눈이 다른 영역 B에 위치하면, 그 점이 보이지 않게 된다.

집적 결상을 정치허상(orthoscopic virtual image)으로 재생할 경우, 픽업과 재생의 상황을 그림 3과 같이 표현할 수 있다. 도치영상으로 재생하는 과정과 마찬가지로 관찰자의 위치에서 나누어지는 영역 1은 기본 점 영상의 결상점들 중 하나의 점만 보이는 영역이고, 영역 2는 두 개의 점이 보이는 영역이다. 각 눈의 위치가 어느 영역에 위치하는가와 기본영상의 결상면의 위치에 따라 도치영상 재생 과정에서와 같이 중복되거나 누락되는 현상이 나타난다. 여기서 기본렌즈의 크기를 L , 렌즈어레이로부터 픽업시 기본영상의 거리를 s_0 , 재생시 기본영상의 거리를 s_I , 픽업시 기본렌즈에 의해 초점이 맞은 거리를 V_0 , 재생시 기본영상의 결상면과 렌즈어레이와의 거리를 V_I , 픽업시 렌즈어레이와 물체사이의 거리를 z_0 , 렌즈어레이로부터 재생시 집적 점의 거리를 z_I 이라고 한다. 그림 3에서와 같이 $z_I = z_0$ 가 되기 위해 기본영상을 $s_I = -s_0$ 의 위치에 놓고 각 기본 영상들을 기본 영상의 중심을 원점으로 하여 180도 회전시키면 원래의 점 물체와 같은 위치에 집적점이 위치하게 된다. 여기서 픽업시 사용되었던 렌즈어레이와 동일한 크기와 초점거리를 갖는 렌즈어레이를 사용하면, 결상은 그림 3에서 렌즈어레이의 오른쪽에 맺히게 된다. 반대로 초점거리를 변화시키거나 기본영상의 크기를 변화시키지 않고 허상으로 재생시키면 재생영상의 깊이 감에 대한 왜곡이 생기게 된다. 따라서 재생상이 허상이므로 픽업시 초점이 맞았던 면과 기본 영상의 결상면을 일치시키기 위해서는 기본 렌즈들의 초점거리를 변화시켜야

된다. 픽업시 기본렌즈의 초점거리를 f_0 , 재생시 기본렌즈의 초점거리를 f_I 라고 하고 렌즈어레이를 중심으로 왼쪽에 있는 점들의 부호를 음수로 정하면 픽업시 기본 영상의 실상으로서의 결상과 재생영상의 허상으로서의 결상에 대한 얇은 렌즈 공식은 각각 아래와 같다.

$$\frac{1}{f_0} = \frac{1}{s_0} - \frac{1}{V_0} \tag{1}$$

$$\frac{1}{f_I} = \frac{1}{V_I} - \frac{1}{s_I} \tag{2}$$

여기서 기본렌즈의 초점거리는 모두 양수이다. 픽업시 초점이 맞았던 면과 기본영상의 결상면을 일치시켰으므로 $s_I = -s_0$ 의 조건을 취하고 f_I 에 대해 정리하면, 집적 결상에서 실상(도치영상)으로 재생할 경우와 같이 이상적인 경우로 다루기 위해 기본렌즈가 가져야 할 초점거리는

$$f_I = \frac{f_0 s_0}{2f_0 - s_0} \tag{3}$$

이 된다. 이때, 그림 3에서의 기본영상의 결상면상의 점들 간의 간격은, z_0 에 위치할 집적 영상에 대해, 재생시 기본영상의 결상면상에서 이웃하는 기본 렌즈를 통하여 보이는 중복된 재생점들 사이의 거리가 된다. 그리고 기본영상의 결상면보다 렌즈어레이로부터 가까이 있는 집적 점들에 대해서는 누락된 길이 $|P_b|$ 는 그림 3에서

$$P_b = \frac{L(V_0 - z_0)}{z_0} \tag{4}$$

와 같이 구할 수 있다. 식 (4)는 실상으로 재생하는 경우에도 성립한다. 여기서 $P_b < 0$ 일 때는 $|P_b|$ 는 중복된 길이가 되며, $P_b > 0$ 이면 $|P_b|$ 는 누락된 길이가 된다. 즉, $|V_0| < |z_0|$ 이면 중복이 생기고, $|V_0| > |z_0|$ 이면 누락이 생기게 된다.

III. 재생된 3차원 영상의 왜곡의 정량화

중복 및 누락을 손실된 양으로 규정하기 위하여 중복 및 누락에 관여하는 픽셀 개수를 구함으로써 정량화 하였다. 기본렌즈에 대응하는 기본영상면에서의 영역의 넓이를 L_e 라고 하면 기본영상이 결상된 크기 V_L 은 얇은 렌즈 공식에 의해 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_L = L_e \frac{V_I}{s_I} \tag{5}$$

그리고 실상으로 결상될 경우에는 $V_L > 0$ 이므로 $V_L = -L_e(V_I/s_I)$ 이다. 이때 기본상의 픽셀 수를 m 이라하면 기본영상의 결상면상의 픽셀 밀도 P 는 m/V_L 이므로 식 (5)에 의해

$$P_I = \frac{s m}{L_e V_I} \tag{6}$$

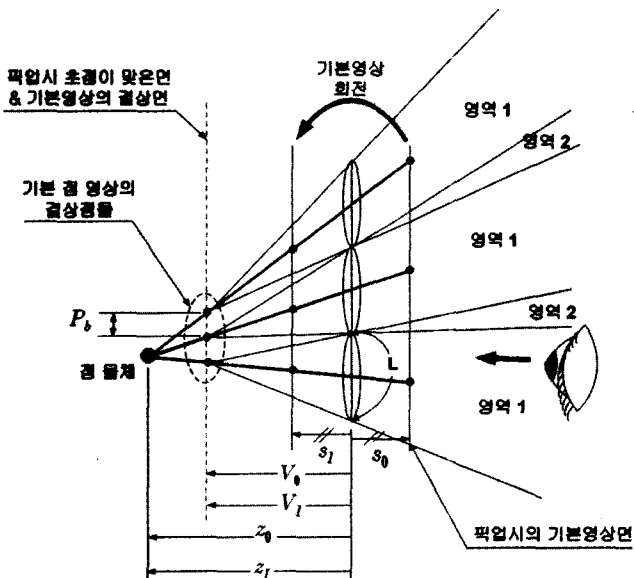


그림 3. 기본영상의 변환을 통하여 정치 영상으로 결상할 때 나타나는 중복.

가 된다. 식 (5)에서 실상으로 재생할 때는 $V_I > 0$ 이므로 $P_I = -(s_I m) / (L_e V_I)$ 가 된다. 그리고 그림 3으로부터 중복 및 누락에 대해 픽업시의 변수들은 고려하지 않고 재생시의 기하학적 관계만으로 중복 및 누락된 길이 P_b 를 표현하면 다음과 같이 일반화된 식으로 표현할 수 있다.

$$P_b = \frac{L(V_I - z_I)}{z_I} \quad (7)$$

재생영상의 중복 및 누락의 정도를 중복과 누락되는 기본영상의 결상면상의 영역에 포함되는 픽셀 수로 정의하면, 기본영상의 결상면상의 영역과 픽셀밀도를 곱함으로써 구할 수 있다. 식 (6)과 식 (7)로부터 중복되거나 누락된 픽셀 개수를 $|D|$ 라 하면 다음과 같다.

$$D = P_I P_b = \frac{s_I m L}{L_e} \left(\frac{1}{V_I} - \frac{1}{z_I} \right) \quad (8)$$

식 (8)에서 z_I 는 재생 시 s_I 와 기본영상의 분포 변화 등에 의존하는 값이므로 집적점의 위치가 픽업시의 점물체의 위치와 같은 경우, 즉 기본영상의 분포 변화 없이 $s_I = -s_0$ 와 $V_I = V_0$ 의 조건을 대입하면 두 렌즈를 통해 관찰되는 영상 중, 중복 또는 누락된 픽셀 개수는 다음과 같다.

$$D = \frac{s_0 m L}{L_e} \left(\frac{1}{z_0} - \frac{1}{V_0} \right) \quad (9)$$

그리고 기본렌즈의 개수를 n 이라고 할 때, 중복 및 누락된 전체 픽셀 수는 다음과 같다.

$$D_T = (n-1)D = \frac{(1-n)s_0 m L}{L_e} \left(\frac{1}{V_0} - \frac{1}{z_0} \right) \quad (10)$$

또한 실상으로 재생할 경우에도 식 (6)에서 $V_I = -V_0$ 이고, 실상일 때의 조건에 의해 식 (8), (9), (10)은 그대로 성립한다. 여기서 s_0 는 항상 0보다 크므로 D_T 가 0보다 작으면 $|D_T|$ 는 중복된 픽셀 수이며, 0보다 크면 $|D_T|$ 는 누락된 픽셀 수가 된다. 그리고 전체 기본영상 배열에 해당된 픽셀 수 nm 에 대해, $L = L_e$ 인 경우에 총 중복 및 누락된 픽셀 수는 V_0, z_0, s_0 에만 관련되는 것을 알 수 있다. 즉 중복 누락의 정도는 단위 면적당 기본렌즈의 개수나 크기에 무관함을 알 수 있다. 그리고 기본영상의 결상면 V_0 에서 집적된 평면 영상 z_0 가 많이 떨어져 있을수록 중복 혹은 누락이 심하다. 재생영상의 깊이감이 한정적인 크기를 갖는 영상에 대해서는 적당한 V_0 에 대해 최적 조건이 있을 수 있으나 임의의 값을 갖는 z_0 에 대해서는 V_0 가 ∞ 일 때, 중복 및 누락이 최소값을 가진다는 것을 알 수 있다. 또한 픽업시 렌즈어레이로부터의 기본영상이 결상되는 거리 s_0 가 짧을수록, 즉 기본렌즈의 초점거리가 짧을수록 그에 비례해서 중복 혹은 누락이 작아지는 것을 알 수 있다. 일반적으로 초점거리를 짧게 하기 위해서는 렌즈의 직경도 작아져야 하며, 그에 따라 렌즈어레

이의 개수가 클수록 중복 및 누락은 작아짐을 알 수 있다.

IV. 실험 및 결과

기본영상은 직접픽업(direct pick-up)^[19] 방법을 사용하여 얻었으며 재생영상은 정치허상의 형태로 재생하기 위하여 그림 4와 같은 실험장치를 구성하였다. 기본영상의 결상면의 위치를 바꾸어가며 재생영상을 관찰하기 위해 기본영상과 렌즈어레이 사이의 거리를 변화시켰다. 이때 사용된 렌즈어레이는 12×8의 프레넬 기본렌즈들의 엇갈린 배열을 사용하였다. 기본렌즈의 형태는 6각형이며 한 변의 길이가 13 mm, 초점거리는 25 mm이다. 픽업시 물체는 렌즈어레이로부터 약 5 cm-20 cm 거리에 두었다. 그림 5(a)는 이때 사용한 물체의 사진이고, 그림 5(b)는 이 물체를 직접픽업한 기본영상이며, 그림 5(c)는 정치영상으로 재생하기 위해 기본영상을 변환시킨 사진이다.

기본영상을 직접픽업하면 픽업시의 기본영상과 렌즈어레이 사이의 거리인 s_0 가 임의대로 정해지는 것이 아니라 렌즈어레이로부터 원래의 물체가 놓인 거리 사이에는 $s_0 = z_0 f_l / (z_0 + f_l)$ z_0 의 관계가 성립한다. 따라서 s_0 를 움직여 렌즈어레이로부터 기본영상의 결상면의 거리 V_I 를 임의의 물체 거리 위치에 맞추었을 때, 렌즈어레이로부터 거리가 다른 나머지 부분은 깊이감에 대해 왜곡을 가지므로 재생영상은 기본영상 분포나 s_0 의 변화에 영향을 받게 된다. 따라서 본 실험에서는 렌즈어레이로부터의 물체거리가 $|V_I|$ 보다 큰 경우와 작은 경우에 대해 $|V_I|$ 변화에 따른 정성적 분석을 하였다.

그림 6은 집적한 영상을 렌즈어레이로부터 약 3 m 떨어진 곳에서 관찰한 사진이다. 그림 6(a)는 렌즈어레이로부터 앞쪽에 있는 토끼의 코까지의 거리를 z_0 로 하여 $-s_0$ 에 기본영상을 위치시켰을 때의 재생영상 사진이다. 그리고 그림 6(b)는 기본영상의 결상면을 앞쪽 토끼의 외곽선을, 그림 6(c)는 뒤쪽

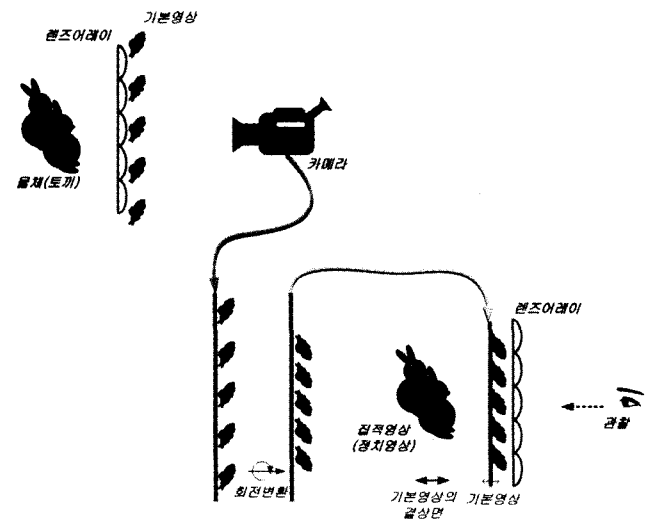


그림 4. 집적결상 실험 개념도.

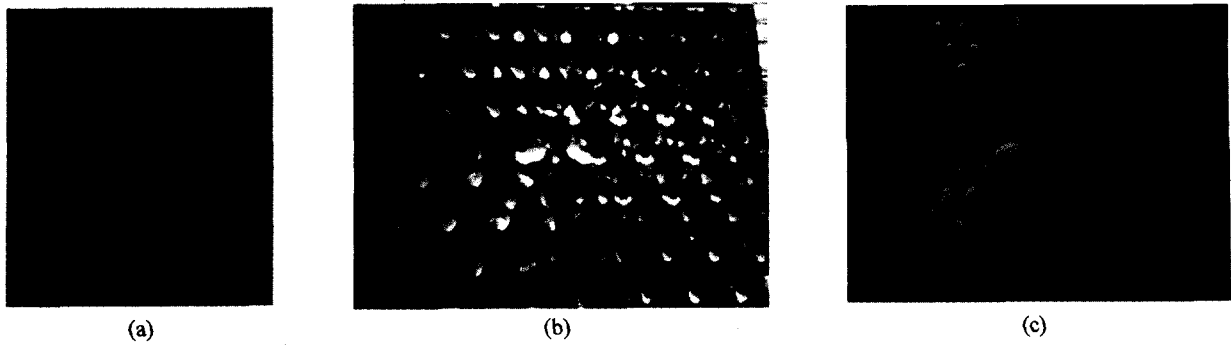


그림 5. 원본영상 및 기본영상. (a) 원본영상, (b) 기본영상, (c) 정치영상 재생을 위하여 회전변환된 기본영상.

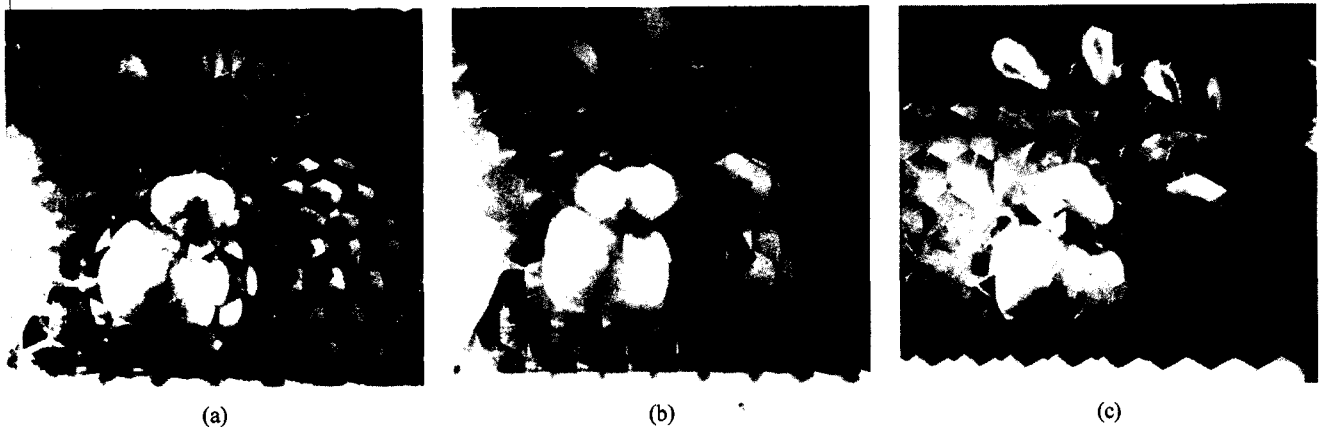


그림 6. 기본영상의 결상면을 달리할 때 나타나는 왜곡을 보여주는 실험결과. (a) 기본영상의 결상면이 재생영상의 앞쪽 토끼 코에 맞추어져 있을 때, (b) 앞쪽 토끼 외곽선에 맞추어져 있을 때, (c) 뒤쪽 토끼에 맞추어져 있을 때.

토끼의 중간 부분을 z_0 로 하여 계산한 거리에 기본영상을 두었을 때의 재생영상 사진이다. 그림 6(a)을 보면 기본영상의 결상면보다 렌즈어레이로부터 멀리 있는 재생영상, 즉 앞쪽 토끼의 코를 제외하고 모두 하나의 기본렌즈를 통하여 보여야 할 부분이 주변의 여러 렌즈를 통해서도 중복적으로 보이는 것을 확인할 수 있다. 그림 6(b)의 경우 기본영상의 결상면이 일치한 앞쪽 토끼의 외곽선보다 렌즈어레이에 가까이 있는 영상의 경우는 토끼의 코가 없어진 것과 같이 누락되어 있고, 더 멀리 있는 뒤 쪽 토끼의 경우 약간 중복되어 있는 것을 볼 수 있다. 그리고 그림 6(c)의 경우 뒤쪽에 있는 토끼는 중복 및 누락이 없으며 앞쪽 토끼는 모두 누락되어 있는 것을 관찰할 수 있다.

따라서 렌즈어레이로부터 기본영상의 결상면까지의 거리 V_1 와 재생영상까지의 거리 z_1 가 같거나, 기본영상을 픽업시와 렌즈어레이에 대해 대칭되는 위치에 놓거나, 렌즈어레이로부터 픽업시 초점이 맞았던 면까지의 거리와 물체까지의 거리가 같으면 중복 및 누락이 없다. 즉 $V_0 = z_0$ 이면 중복적으로 보이거나 누락되는 부분이 없고, $|V_1| < |z_1|$ 또는 $|V_0| < |z_0|$ 이면 중복, $|V_1| > |z_1|$ 또는 $|V_0| > |z_0|$ 이면 누락이 생기게 된다. 그리고 기본영상의 결상면에서 더 멀리 떨어져 있는 물체일수록 중복 또는 누락이 심한 것을 확인할 수 있다.

V. 결 론

3차원 영상 재생을 위한 집적결상법에서 재생영상 영역과 관찰자 영역 상에 재생영상의 일부분이 중복되거나 누락되는 원인을 조사하였다. 이는 픽업시 렌즈어레이를 통하여 결상되는 기본영상은 입체적 영상인데 반해, 재생시는 평면적 영상의 형태를 가지기 때문이다. 본 논문에서는 기본적인 변수들에 따른 중복 및 누락의 정도를 정량화하고, 일반적인 경우에 대한 최소 조건을 구하였다. 재생영상의 깊이감이 특정범위로 결정되지 않는 즉 모든 깊이감에 대해 자유로이 재생하는 것을 목적으로 하는 집적결상계의 경우, 기본영상의 결상면은 재생시 기본렌즈의 초점거리에 위치시킬 때 중복 및 누락의 양이 최소화됨을 알 수 있었다. 또한 실험을 통해 픽업시 초점이 맞은 면과 물체와의 상대적 위치에 따라 중복 또는 누락 특성이 결정되고 그 위치 사이의 거리에 따라 중복 및 누락의 정도가 달라짐을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 2003년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2003-002-C00096).

참고문헌

- [1] G. Lippmann, "La photographie integrale," *C. R. Acad. Sci.* vol. 146, pp. 446-451, 1908.
- [2] Bruce Lane, "Stereoscopic displays," in *Processing and Display of Three-Dimensional Data*, J. J. Pearson, Ed., *Proc. SPIE*, vol. 0367, pp. 20-32, 1982.
- [3] A. Marraud and M. Bonnet, "Restitution of a stereoscopic picture by means of a lenticular sheet," in *Three-Dimensional Imaging*, J. P. Ebboni, Ed., *Proc. SPIE*, vol. 0402, pp. 129-132, 1983.
- [4] F. Okano, H. Hoshino, J. Arai, and I. Yuyama, "Three-dimensional video system based on integral photography," *Opt. Eng.* vol. 38, no. 6, pp. 1072-1077, 1999.
- [5] J. Arai, F. Okano, H. Hoshino, and I. Yuma, "Gradient-index lens-array method based on real-time integral photography for three-dimensional images," *Appl. Opt.* vol. 37, no. 11, pp. 2034-2045, 1998.
- [6] H. Arimoto and B. Javidi, "Integral three-dimensional imaging with digital reconstruction," *Opt. Lett.* vol. 26, no. 3, pp. 257-259, 2001.
- [7] H. Hoshino, F. Okano, H. Isono, and I. Yuyama, "Analysis of resolution limitation of integral photography," *J. Opt. Soc. Am. A.* vol. 15, no. 8, pp. 2059-2065, 1998.
- [8] L. Erdmann and K. J. Gabriel, "High-resolution digital integral photography by use of a scanning microlens array," *Appl. Opt.* vol. 40, no. 31, pp. 5592-5599, 2001.
- [9] S.-H. Shin and B. Javidi, "Speckle-reduced three-dimensional volume holographic display by use of integral imaging," *Appl. Opt.* vol. 41, no. 14, pp. 2644-2649, 2002.
- [10] B. Lee, S. Jung, and J.-H. Park, "Viewing-angle-enhanced integral imaging by lens switching," *Opt. Lett.* vol. 27, no. 10, pp. 818-820, 2002.
- [11] S. H. Shin and B. Javidi, "Viewing-angle enhancement of speckle-reduced volume holographic three-dimensional display by use of integral imaging," *Appl. Opt.* vol. 41, no. 26, pp. 5562-5567, 2002.
- [12] B. Lee, S. Y. Jung, S.-W. Min, and J.-H. Park, "Three-dimensional display by use of integral photography with dynamically variable image planes," *Opt. Lett.* vol. 26, no. 19, pp. 1481-1482, 2001.
- [13] J.-H. Park, S.-W. Min, S. Jung, and B. Lee, "Analysis of viewing parameters for two display methods based on integral photography," *Appl. Opt.* vol. 40, no. 8, pp. 5217-5232, 2001.
- [14] S.-W. Min, B. Javidi, and B. Lee, "Enhanced three-dimensional integral imaging system by use of double display devices," *Appl. Opt.* vol. 42, no. 20, pp. 4186-4195, 2003.
- [15] T. Okoshi, "Optimum design and depth resolution of lens-sheet and projection-type three-dimensional displays," *Appl. Opt.* vol. 10, no. 10, pp. 2284-2291, 1971.
- [16] 서장일, 차성도, 신승호, "3차원 영상 구현을 위한 집적결상계의 특성 분석," *Photonics conference 2002, 용평리조트, 논문 T3D3*, pp. 365-366, 2002.
- [17] A. Woods, T. Docherty, and R. Koch, "Image distortions in stereoscopic video systems," in *Stereoscopic displays and applications IV*, J. O. Merritt, S. S. Fisher, Ed., *Proc. SPIE*, vol. 1915, pp. 36-48, 1993.
- [18] J. W. McCandless and S. R. Ellis, "The effect of eye position on the projected stimulus distance in a binocular head-mounted display," in *Stereoscopic displays and applications VII*, J. O. Merritt, S. A. Benton, A. J. Woods, Ed., *Proc. SPIE*, vol. 3957, pp. 41-48, 2000.
- [19] F. Okano, H. Hoshino, J. Arai, and I. Yuyama, "Real-time pickup methods for a three-dimensional image based on integral photography," *Appl. Opt.* vol. 36, no. 7, pp. 1598-1603, 1997.

Analysis of image distortion in 3D integral imaging display

Jang-Il Ser, Sungdo Cha, and Seung-Ho Shin[†]

Department of Physics, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

[†]*E-mail: shinsh@kangwon.ac.kr*

(Received April 8, 2004, Revised manuscript May 27, 2004)

In the integral imaging system for 3D display, we have investigated the image distortions, such as duplication and omission, which are presented in the reconstructed image. We have also discussed the quantitative condition which minimizes the distortion, with several fundamental variables. In addition, we present the experimental results which support the quantitative analysis of the distortion.

OCIS Codes : 100.6890, 100.3010, 110.2960, 110.2990.