《연구논문》 Hankook Kwanghak Hoeji, Volume 16, Number 3, June 2005

집적결상법에서 기본영상의 크기 변환에 따른 3차원 재생영상의 특성 분석

서장일 · 신승호†

강원대학교 물리학과

㉮ 200-701 강원도 춘천시 강원대학길 1

(2005년 2월 11일 받음, 2005년 5월 2일 수정본 받음)

3차원 영상 재생을 위한 집적결상법에서 픽업시 기본영상의 크기는 기본렌즈 크기, 기본렌즈와 기본영상 사이의 간격 등 몇 가지 변수들과 일정한 관계를 갖는다. 이 기하학적 관계들을 분석하고, 기본영상의 크기 및 거리가 픽업시와 다른 경우 기본영상의 배열이나 개별적인 크기 변환에 의해 재생되는 3차원영상의 특성변화를 이론적으로 분석하고 실험을 통해 확인하였다.

주제어 : Integral imaging, Elemental image resizing, 3D display.

I. 서 론

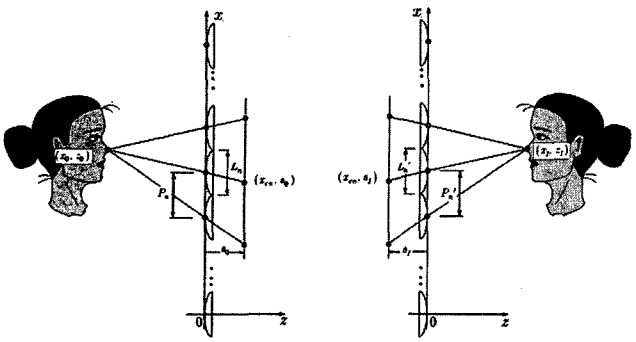
3차원 영상을 구현하기 위한 노력의 일환으로 다양한 3차원 영상 재생법(적청안경(color glass) 방식, 렌티큘라(lenticular) 방식, 프리즘 어레이(prism array) 방식, 슬릿 어레이(slit array) 방식 등)들이 고안되어왔고, 전자나 기계 장비들의 발전과 더불어 많은 진전이 있어 왔다. 그러나 상용화될 수 있을 정도로 발전한 것은 주로 스테레오스코픽(stereoscopic) 방식들이고 이것은 관찰자의 위치에 따라 해당 각도의 모습이 연속적으로 보이지 않기 때문에 완벽한 3차원 영상이라고는 할 수 없다. 그런 면에서 좀 더 완벽한 3차원 영상에 가까운 오토스테레오스코픽(aoutostereoscopic) 영상 구현이 최근 들어 큰 관심거리가 되고 있다. 그 중 체적 방식이나, 홀로그라피(holography)등과 비교할 때, 기계적인 장치나 레이저와 같은 특별한 광원이 필요하지 않는 등의 장점을 갖는 집적결상법(integral imaging)은 특히 이와 같은 특성을 구현하게 할 수 있는 방식으로 주목을 받고 있다. 이 집적결상법은 Lippmann에 의해 처음으로 고안되었는데,[1] 일반적으로 가장 완벽한 3차원 영상을 재생하는 홀로그라피와 같이 3차원 물체로부터의 빛의 파면을 간섭무늬 형태로 저장함으로써 그 물체로부터의 빛의 밝기 및 방향성분을 저장하는 것이 아니라, 렌즈어레이(lens array)를 이용하여 각 기본렌즈(elemental lens) 뒤에 결상되는 작은 기본영상(elemental image)들을 저장하고 그들 사이의 위치관계를 통하여 빛의 방향성분 및 세기를 저장하는 방식이다. 재생 시는 렌즈어레이로 이 기본영상들을 다시 확대 결상시킴으로써 원래의 물체로부터 발산했던 빛의 방향과 세기를 복원할 수 있다.

그러나 이 집적결상법은 아직 많은 문제점을 가지고 있다. 기본영상의 해상도가 낮은 문제[2-4]나 시야각문제[5-6], 깊이감 문제[7-8] 등 픽업(pick up) 및 재생 장치의 기술적인 문제등이 많이 나타나고 있다. 이와 같은 기술적인 문제들을 해결하기 위해서는 재생 및 픽업장치에서의 기본렌즈와 기본영상 사이의 관계나 기본적인 변환에 따른 재생영상의 변화 등 기본적인 관계에 대한 연구가 필요하다. 최근 들어 기본영상 크기와 재생영상 사이의 관계를 분석한 연구가 수행된 바 있다[9]. 이 논문에서는 배열된 모든 기본렌즈와 기본영상의 크기가 일정한 경우 기본영상의 크기 변환과 재생영상의 확대 및 축소, 슈도스코픽(pseudoscopic)-올쏘스코픽(orthoscopic) 변환, 시야각 변화 등 재생영상에 대한 변화들과의 관계를 다루었다. 본 논문에서는 크기가 다른 렌즈로 구성된 복합렌즈어레이를 사용할 경우와 배열된 기본영상들이 서로 다른 비율로 변환될 경우에도 적용이 가능한 일반적인 경우를 해석하고, 이를 이용하여 픽업 후 기본렌즈크기는 변환 없이 기본영상의 개별적 그리고 전체적 크기변환을 주었을 때의 재생영상의 변화를 분석하고 실험을 통해 확인하였다.

II. 기본영상의 크기 변환이 없을 때 픽업 및 재생장치와 물체 및 재생영상 간의 대응관계

그림 1(a)는 물체상의 임의의 점에 대해 기본영상을 픽업할 때의 기본영상의 분포와 점물체의 위치 사이의 대응관계이고, 그림 1(b)는 그림 1(a)에서 픽업된 기본영상들로부터 집적점이 재생될 때, 기본영상과 집적점의 위치사이의 대응관계이다. 실제 집적결상계에서 다수의 기본렌즈를 포함한 렌즈어레이를 사용할 경우 온도에 의한 영향이나 렌즈 고정장치에 의한 변형 등을 무시할 수 없다. 이 경우 관찰자의 위치에 대한 기본영상의 해상도의 효율성 등 시스템의 개선을 위해 기본영상의 위치별 크기 분포가 다를 수 있다. 이에 따라 그림 1(a)에서의 설정된 좌표로부터 점 물체에 대응되는 기본 점영상의 분포를 구해보면

† E-mail: shinsh@kangwon.ac.kr



(a) (b)

그림 1. 점물체로부터 픽업되는 기본 점영상들의 분포(a)와 기본 점영상들의 분포로부터 재생되는 집적점(b).

$$x_{en}=\left(1-\frac{s_0}{z_0}\right)\sum_{i=0}^{n}P_i+\frac{x_0 s_0}{z_0} \tag{2.1}$$

와 같다. 여기서 z축상에 있는 기본렌즈를 0번째 렌즈로 하였을 때, P_i는 $i-1$번째 기본렌즈와 i번째 기본렌즈 중심 간의 간격이다(즉 $n=0,1,2,3,\ldots\ldots$으로 정수이고, $P_0=0$이다.). s_0는 각각 렌즈어레이로부터 기본영상이 결상되는 거리이며 x_0와 z_0는 점 물체의 좌표이다. 이 때 픽업된 기본영상을 변형시키지 않고 그대로 재생시키면 그림 1(b)로부터 기본영상과 재생영상 사이의 대응관계는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$x_{en}=\left(1-\frac{s_I}{z_I}\right)\sum_{i=0}^{n}P_i'+\frac{x_I s_I}{z_I} \tag{2.2}$$

여기서 P_i'는 재생시의 $i-1$번째 기본렌즈와 i번째 기본렌즈 중심 간의 간격이고, s_I는 재생시의 렌즈어레이로부터 기본영상까지의 거리, x_I와 z_I는 집적점의 좌표이다. 그리고 식 (2.1)과 식 (2.2)으로부터 기본 점영상들의 분포와 집적점 사이의 대응관계를 다음과 같은 관계식으로 표현할 수 있다.

$$\left(1-\frac{s_0}{z_0}\right)\sum_{i=0}^{n}P_i+\frac{x_0 s_0}{z_0}=\left(1-\frac{s_I}{z_I}\right)\sum_{i=0}^{n}P_i'+\frac{x_I s_I}{z_I} \tag{2.3}$$

이 식은 집적결상계에서 기본영상의 형태, 크기, 기본영상과 렌즈어레이 사이의 거리, 기본렌즈의 전체적 크기 또는 위치별로 기본렌즈의 크기가 다를 경우 등 임의의 변환을 주었을 때, 재생영상의 형태변화에 대한 일반적인 식이다. 식 (2.3)을 다음과 같이 정리할 때,

$$\sum_{i=0}^{n}\left\{\left(1-\frac{s_0}{z_0}\right)P_i-\left(1-\frac{s_I}{z_I}\right)P_i'\right\}-\left\{\frac{x_I s_I}{z_I}-\frac{x_0 s_0}{z_0}\right\}=0 \tag{2.4}$$

집적이 이루어지기 위해서는 각 기본 점영상들로부터 각 기본렌즈의 중심을 지나는 광선이 한 점으로 모여야 하므로 첫째 항은 n에 대해 독립적으로 일정한 값을 가져야 한다. 그러기 위해서는 다음 식이 성립해야 한다.

$$\begin{aligned}\sum_{i=0}^{n-1}\left\{\left(1-\frac{s_0}{z_0}\right)P_i-\left(1-\frac{s_I}{z_I}\right)P_i'\right\}+\left\{\left(1-\frac{s_0}{z_0}\right)P_n-\left(1-\frac{s_I}{z_I}\right)P_n'\right\}\\ =\sum_{i=0}^{n-1}\left\{\left(1-\frac{s_0}{z_0}\right)P_i-\left(1-\frac{s_I}{z_I}\right)P_i'\right\}\end{aligned} \tag{2.5}$$

여기서 첫째 항과 마지막 항은 서로 상쇄되므로 다음과 같이 간단한 식으로 표현된다.

$$\left(1-\frac{s_0}{z_0}\right)P_n-\left(1-\frac{s_I}{z_I}\right)P_n'=0 \tag{2.6}$$

식 (2.6)은 픽업된 기본영상의 변환 없이 재생할 경우의 집적 조건이다. 여기서 P_n과 P_n'사이의 관계는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{P_n'}{P_n}=\frac{1-s_0/z_0}{1-s_I/z_I} \tag{2.7}$$

즉 기본영상 픽업시와 재생시 기본영상과 렌즈어레이이 사이의 간격이 각 해당 기본렌즈마다 일정한 거리를 유지한다면, 기본렌즈들 사이의 간격은 각각 다르더라도 픽업 시의 임의의 두 기본렌즈들 사이의 간격과 그에 대응되는 재생시의 두 기본렌즈들사이의 간격은 각 모든 기본렌즈들에 대해 일정한 비율을 가져야 한다. 그리고 식 (2.6)에서의 P_n과 P_n'은 각각 임의 번째 기본렌즈 사이의 간격이므로 식 (2.4)의 첫 번째 항은 0이 된다. 따라서 두 번째 항도 0이 되어 다음과 같은 관계식이 성립하여야 한다.

$$\frac{x_I s_I}{z_I}=\frac{x_0 s_0}{z_0} \tag{2.8}$$

식 (2.6)로부터 재생되는 집적점의 깊이감에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$z_I=\frac{s_I}{\left(\frac{s_0}{z_0}-1\right)\frac{P_n}{P_n'}+1} \tag{2.9}$$

식 (2.9)을 식 (2.8)에 대입하고 정리하면 재생되는 집적점의 x축 위치는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$x_I=\frac{x_0 s_0/z_0}{\left(\frac{s_0}{z_0}-1\right)\frac{P_n}{P_n'}+1} \tag{2.10}$$

식 (2.9)와 식 (2.10)은 크기가 다른 기본렌즈들이 섞여있는 복합렌즈 어레이를 사용하는 경우의 재생영상의 형태에 대한 일반적인 해이다. 여기서 렌즈어레이나 렌즈어레이의 고정 장

치가 외력이나 온도변화 또는 재생 장치의 성능 향상을 위한 재생시스템에서의 능동적인 변환, 픽업 시 기본렌즈들의 초점거리가 각각 다른 렌즈어레이를 사용하여 직접픽업(direct pick-up)할 경우 등에 의해 기본렌즈들과 각 해당 기본영상들 사이의 거리가 서로 달라질 수 있다. 이에 따른 좀 더 일반적인 식과 해를 식 (2.3)에서 s_0와 s_I를 각각 s_{0n}과 s_{In}으로 표현함으로써, 그리고 이를 n에 독립적일 조건을 통하여 전개함으로써 각각 얻을 수 있다. 그러나 여기서는 논의의 편의를 위해 기본렌즈와 기본영상 사이의 거리는 모두 일정할 경우로 국한하였다.

크기가 다른 기본렌즈들이 섞여있는 복합렌즈 어레이를 사용하는 경우, 또는 기본렌즈들이 외력이나 온도 변화에 의해 위치별로 달리 그 크기가 변형되는 경우를 포함하기 위해, 그리고 이에 따라 설정된 P_n과 P_n'에 부합시키기 위해 픽업 시와 재생시의 기본렌즈의 크기는 각각 L_n과 L_n'으로 표시하여야 한다. 여기서 좀 더 단순한 $P_n = P_n' = L_n = L_n'$인 경우, 식 (2.9)와 (2.10)은 각각

$$z_I = \frac{s_I}{s_0} z_0 \tag{2.11}$$

$$x_I = x_0 \tag{2.12}$$

와 같이 간단히 정리된다. 식 (2.11)로부터 재생영상의 깊이감은 픽업시 기본렌즈와 기본영상사이의 거리에 단순 반비례하며, 재생시의 기본렌즈와 기본영상 사이의 거리에 단순 비례한다는 것을 알 수 있다. 그리고 식 (2.12)은 x축 방향으로는 아무런 변화가 없음을 의미한다.

III. 기본영상배열의 크기 변환이 있을 때의 픽업 및 재생장치와 물체 및 재생영상 간의 대응관계

기본영상 픽업 후, 기본영상 배열의 크기 변환은 재생시 집적결상계에서 기본렌즈의 개수가 많을 경우, 픽업시와 재생시 기본렌즈나 기본영상의 미세한 크기 차이 또는 온도 변화 등에 따라 기본영상 재생 판넬이나 스크린의 부분적인 미세 크기변형 또는 제작 시 정밀성 문제에 의해 쉽게 나타날 수 있는 변환이다. 따라서 이에 따른 집적영상의 변화는 재생장치의 정밀도 문제나 시스템의 안정성 문제를 검토하는데 있어서 중요한 요소가 될 수 있다. 뿐만 아니라 집적결상 시스템의 성능개선를 위해 능동적으로 기본영상 배열의 변환을 이용할 경우[10]에도 이에 따라 나타나는 재생영상의 변화는 반드시 고려되어야 할 중요한 요소이다.

픽업된 기본영상에서 임의의 위치 ϕ를 중심으로 확대율 M으로 확대시킨 기본영상의 분포는 그림 2로부터 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$x_{en}' = Mx_{en} + \phi(1-M) \tag{3.1}$$

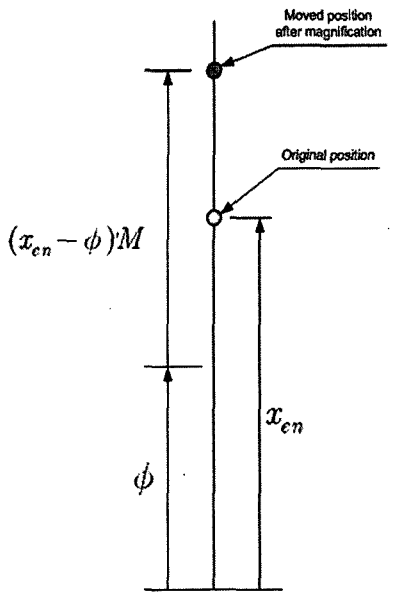


그림 2. ϕ를 중심으로 M의 비율로 확대시켰을 때 이동된 좌표.

여기에 식 (2.1)을 대입하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$x_{en}' = M\left\{\left(1-\frac{s_0}{z_0}\right)\sum_{i=0}^{n} P_i + \frac{x_0 s_0}{z_0}\right\} + \phi(1-M) \tag{3.2}$$

이 때, $n=0,1,2,3,.....$으로 정수이다. 점물체와 재생된 점영상의 대응관계를 정리하면

$$\sum_{i=0}^{n}\left\{\left(1-\frac{s_0}{z_0}\right)MP_i - \left(1-\frac{s_I}{z_I}\right)P_i'\right\} + \left(\frac{Mx_0 s_0}{z_0} - \frac{x_i s_I}{z_I}\right) + \phi(1-M) = 0 \tag{3.3}$$

와 같고 식 (2.4)에서의 경우와 같이 첫째 항은 n에 대해 독립적이어야 하므로 다음의 관계들이 성립해야 한다.

$$\left(1-\frac{s_0}{z_0}\right)MP_n - \left(1-\frac{s_I}{z_I}\right)P_n' = 0 \tag{3.4}$$

$$\left(\frac{Mx_0 s_0}{z_0} - \frac{x_i s_I}{z_I}\right) + \phi(1-M) = 0 \tag{3.5}$$

여기서 $P_n = P_n' = L_n = L_n'$라고 하면, 식 (3.4)로부터 집적점영상의 깊이감과 x축 방향으로의 위치는 각각 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$z_I = \frac{s_i z_0}{(s_0 - z_0)M + z_0} \tag{3.6}$$

$$x_I = \frac{Mx_0 s_0 + \phi(1-M)z_0}{(s_0 - z_0)M + z_0} \tag{3.7}$$

식 (3.6)로부터 기본렌즈의 개수가 많을 경우, $|s_0| \ll |z_0|$이므로 $M \approx 1$인 경우에만 z_0에 의존하는 깊이 감을 갖는 영상으로 재생할 수 있다. 그리고 그림 1로부터 기본영상면 상의 동일한 점간의 간격을 구하면

$$P_{en} = x_{en} - x_{e(n-1)} = \left(1 - \frac{s_0}{z_0}\right)\left\{\sum_{i=0}^{n} P_i - \sum_{i=0}^{n-1} P_i\right\} = P_e = P_n\left(1 - \frac{s_0}{z_0}\right) \tag{3.8}$$

와 같고, $s_I = s_0$이고 $P_n = L$일 때 $P_{en} = P_e$로 일정하므로 식 (3.6)는 다시

$$z_I = \frac{L - P_e}{L - MP_e} z_0 \tag{3.9}$$

와 같이 표현할 수 있다. 정치허상의 경우는 $P_e < L$인 경우에 해당하므로 $M < 1$인 경우에는 집적 영상의 깊이감 즉 렌즈어레이로부터 떨어져 있는 정도가 감소하고, $M > 1$인 경우에는 $MP_e = L$일 때까지 집적 영상의 깊이감이 증가하게 된다. 그리고 도치실상의 경우는 $P_e > L$인 경우에 해당하므로 $M < 1$인 경우에는 $MP_e = L$일 때까지 집적 영상의 크기가 확대되고, $M > 1$인 경우에는 집적 영상의 깊이감이 감소하는 것을 알 수 있다. 재생영상의 깊이감에 대한 미소크기는 다음과 같이 구할 수 있는데,

$$\Delta z_I = \frac{1}{\frac{z_0^2}{M}\left\{M\left(\frac{1}{z_0} - \frac{1}{s_0}\right) + \frac{1}{s_0}\right\}^2} \Delta z_0 \tag{3.10}$$

식 (3.10)의 분모가 물체 깊이에 대한 2차 함수가 된다. 즉 깊이감이 깊은 재생영상일 수록 매우 납작해지는 것을 알 수 있다. 그리고 깊이감이 $z_0 \to \infty$인 경우, 즉 기본영상 배열의 확대, 혹은 축소에 의해 표현될 수 있는 최대 깊이감은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$z_I = -\frac{s_I}{(M-1)} \tag{3.11}$$

그리고 x축 위치에 대한 식 (3.7)은 기본영상의 분포 변환이 없을 때와 마찬가지로 s_I에 관련이 없다. $P_n = P_n' = L$라고 할 때, $x_I = x$일 때의 x_0의 위치는 ϕ이고, 재생영상의 x방향으로의 크기는

$$\Delta x_I = \frac{Ms_0/z_0}{\left(\frac{s_0}{z_0} - 1\right)M + 1} \Delta x_0 \tag{3.12}$$

와 같다. 식 (3.8)의 경우로 치환하면 다음과 같다.

$$\Delta x_I = \frac{L - P_e}{\frac{L}{M} - P_e} \Delta x_0 \tag{3.13}$$

정치허상의 경우는 $P_e < L$인 경우에 해당하므로 $M < 1$인 경우에는 집적 영상의 크기가 축소하는 것을 알 수 있고, $M < 1$인 경우에는 $\frac{L}{M} = P_e$일 때까지 집적 영상의 크기가 확대된다. 도치실상의 경우는 $\delta_e > L$인 경우에 해당하므로 $M < 1$인 경우에는 $\frac{L}{M} = P_e$일 때까지 집적 영상의 크기가 확대되고, $M > 1$인 경우에는 집적 영상의 크기가 축소되는 것을 알 수 있다.

IV. 기본영상의 개별적 크기 변환에 따른 집적영상

기본영상의 크기변환 중 각 기본영상의 중심을 원점으로 확대 혹은 축소시키는 변환 또한 집적 결상계의 성능 향상을 위한 연구에서 기본적으로 응용해 볼 수 있는 중요한 소재이다[6]. 우리는 이에 대해 기본영상 분포와 집적영상의 대응관계식을 이용하여 재생영상의 변화를 확인해 보았다. 그림 3과 같이 ξ_n을 n번째 기본영상 영역의 중심으로부터의 기본점영상의 좌표라 하면, 변환된 기본영상 배열의 분포는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$x_{en} = \sum_{i=0}^{n} P_i + \xi_n \tag{4.1}$$

각 기본영상 영역의 중심을 중심에 대해 확대 혹은 축소시켰을 때, 확대율을 M로 하면 기본 영상의 분포는

$$x_{en}' = \sum_{i=0}^{n} P_i + M\xi_n = \sum_{i=0}^{n} P_i + M\frac{s_0}{z_0}\left(x_0 - \sum_{i=0}^{n} P_i\right) \tag{4.2}$$

와 같이 표현할 수 있으며, 점 물체와 재생 점영상 사이의 대응관계는 다음과 같이 표현할 수 있다.

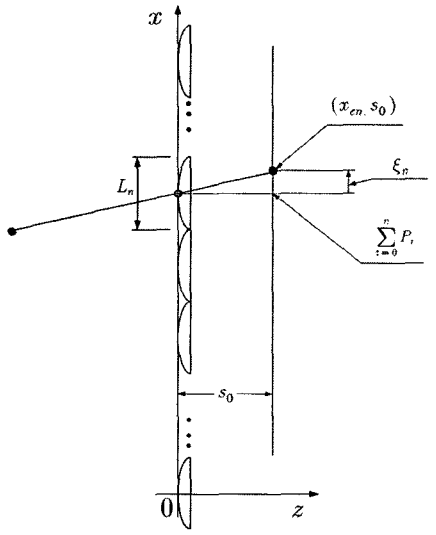


그림 3. 기본영상 분포

$$\sum_{i=0}^{n} P_i + M\frac{s_0}{z_0}\left(x_0 - \sum_{i=0}^{n} P_i\right) = \sum_{i=0}^{n} P_i' + \frac{s_I}{z_I}\left(x_I - \sum_{i=0}^{n} P_i'\right) \tag{4.3}$$

그리고 식 (2.4)에서의 경우와 같이 식이 성립할 조건으로부터 재생 점영상의 깊이감과 렌즈어레이와 평행한 방향으로의 위치를 구하면 각각

$$z_I = \frac{s_I}{\left(M\frac{s_0}{z_0} - 1\right)\frac{P_n}{P_n'} + 1} \tag{4.4}$$

$$x_I = \frac{Mx_0 s_0 / z_0}{\left(M\frac{s_0}{z_0} - 1\right)\frac{P_n}{P_n'} + 1} \tag{4.5}$$

와 같다. 식 (4.4), (4.5)에서 $P_n = P_n' = L$일 경우에는 다음과 같이 표현된다.

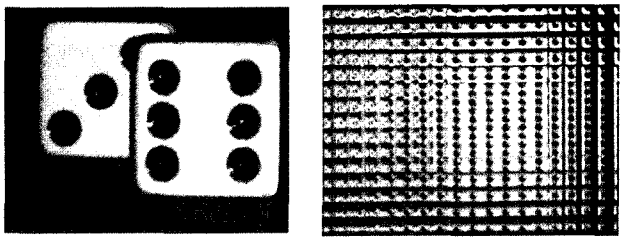
$$z_I = \frac{s_I}{Ms_0} z_0 \tag{4.6}$$

$$x_I = x_0 \tag{4.7}$$

윗식에서 깊이감은 확대율 M에 단순히 반비례하며, 렌즈어레이에 평행한 방향으로는 변화하지 않는다. 여기서 기본영상의 분포 변환을 이용하여 재생영상의 x방향으로의 크기는 변화시키지 않고 깊이감만 변화시키고자 할 경우, 기본영상의 개별적인 확대를 통하여 가능하다. 반대로 기본영상의 개별적 크기 변환은 물체거리가 가까울 때와 멀어질 때, 자연스럽게 일어난다[6]. 그러나 입체적 정보를 갖는 물체에 대해 렌즈어레이 가까이 놓고 픽업함으로써 확대된 기본영상은 픽업된 기본영상을 일정하게 확대시킨 것과는 다르다. 왜냐하면 식 (4.6)에서 볼 수 있듯이 해당 z_0에 대해 각각 다른 확대율 M을 적용시켜야 하기 때문이다. 만약 임의의 확대율을 모든 z_0에 대해 적용시킨다면, 즉 입체적 정보를 갖는 물체에 대한 각 기본영상들을 단순히 확대 또는 축소시킨다면, 재생영상은 식 (4.7)의 미분을 통해서 알 수 있듯이 $1/M$만큼 깊이감에 대해 납작해지는 왜곡이 생기게 된다.

V. 영상처리를 통한 실험

이론적 분석을 광학적 실험을 통해 확인하고자 할 때, 기본 렌즈의 수차나 기본영상과 기본렌즈 사이 간격의 정밀성 등 이론적 분석과 관련된 변수 이외에 불필요한 변수들이 간섭하게 된다. 이에 따라 불필요한 외부간섭이 없는 상황에서의 실험은 매우 중요하다. 렌즈어레이의 수차 등의 효과를 줄이기 위하여 기본영상은 렌즈어레이를 이용한 픽업과정에 의해 얻고, 영상처리를 통해 기본영상으로부터 집적영상을 추출하는 방법을 사용하여 실험하였다.



(a) (b)

그림 4. (a) 모의실험을 위한 물체, (b) 렌즈어레이를 통하여 픽업된 물체에 대한 기본영상.

5.1. 기본영상 배열의 전체적 확대

그림 4(a)는 픽업된 물체이고 그림 4(b)는 픽업된 기본영상 배열이다. 기본렌즈 크기는 1 mm이고 초점거리 3.3 mm인 기본렌즈가 21×15개 배열돼있는 렌즈어레이를 사용하였다. 전체 기본영상 배열에 사용된 픽셀수는 1380×1035이고 물체는 약 렌즈어레이로부터 5 cm 정도 떨어진 곳에서 픽업하였다. 재생시 가상의 관찰거리는 20 cm로 하여 재생영상을 얻었다. 그림 5에서 (a), (b), (c)는 각각 확대율을 1.015, 1, 0.985로 하였을 때의 모의실험 결과이다. 그림 5에서 영상들의 위쪽에서 아래쪽으로의 배열순서는 관찰자가 렌즈어레이에 대해 왼쪽에서 오른쪽으로 위치를 이동하며 관찰했을 경우에 보일 재생상들이다. 그리고 도치영상으로 재생 시 재생영상의 깊이감이 뒤바뀌므로 3의 눈을 갖는 주사위가 6의 눈을 갖는 주사위 보다 더 앞쪽에 재생된 것에 해당한다. 기본

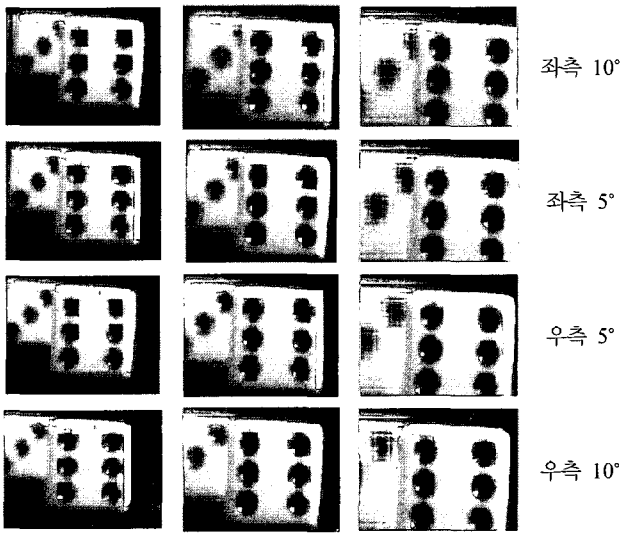
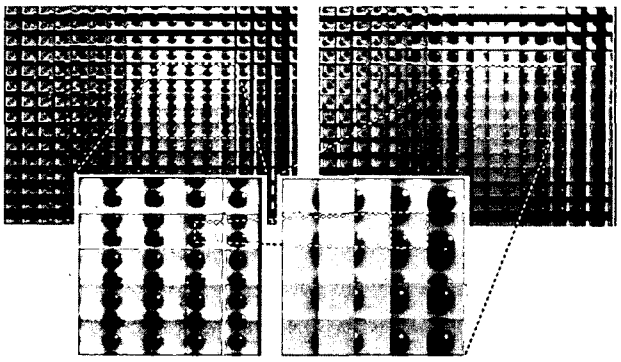


그림 5. 기본영상 배열의 축소변환에 따른 광실험 결과. (a) 기본영상 배열을 전체적 확대변환 시켰을 경우, (b) 기본영상 배열의 변환이 없을 경우, (c) 기본영상 배열의 전체적 축소변환을 시켰을 경우의 재생영상.

영상 배열을 전체적으로 확대시키면 재생영상의 크기가 축소되며, 특히 멀리 있는 물체일수록 더 크게 축소되고, 눈이 3인 주사위 상의 임의의 점에 대한 위치와 눈이 6인 주사위 상의 임의의 점에 대한 위치간의 상대적 변화가 작아짐을 통하여 재생상의 깊이감이 줄어들었음을 확인 할 수 있다. 축소시켰을 때는 확대하였을 때와 반대의 현상이 일어남을 확인 할 수 있다.

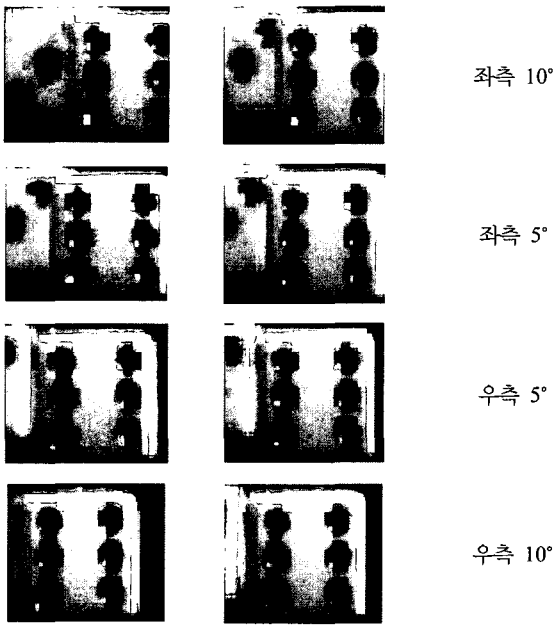
5.2. 기본영상의 개별적 확대

기본영상의 개별적 확대는 그림 6과 같이 원본 기본영상(그림 6 (a))을 그림 6(b)와 같이 각 개별 기본영상들의 중심을 원점으로 일정비율로 확대시켰다. 이 확대에 따라 기본영상들 간에 겹쳐지는 부분들은 잘라냈다. 그림 7은 이에 따른 합성 결과이다. 이 때 관찰거리에 따른 합성상의 크기변화 요소를 없애기 위해 무한 거리로 하였다. 그림 7(a)는 기본영상의 개별적 확대전의 기본영상으로 합성한 영상이며, 그림 7(b)는 기본영상의 개별적 확대 후 합성한 영상이다. 기본영상의 개별적 확대 후 재생영상의 크기는 변하지 않은 반면, 깊이감은 작아진 것을 확인할 수 있다. 그리고 기본영상의 개별적 축소에 관련하여서는 기본영상 배열의 전체적 확대 실험에서 알 수 있듯이 축소나 확대는 단순히 상대적인 것이므로 생략하였다.



(a) (b)

그림 6. 기본영상의 개별적 확대. (a) 원본 기본영상과 (b) 개별적으로 확대된 기본영상.



(a) (b)

그림 7. 기본영상의 개별적 확대변환에 따른 광실험 결과. (a) 개별 기본영상의 확대변환 이전의 재생영상, (b) 개별 기본영상의 확대변환 후의 재생영상.

VI. 광학적 재생을 통한 실험

광학적 재생을 통하여 재생영상의 변화를 확인하고자 할 경우, 집적결상계가 가지고 있는 재생영상의 해상도 문제에 의해 미세한 변화의 관찰이 힘들다. 따라서 본 실험에서는 기본영상 픽업 후 렌즈어레이 후면에 기본영상을 재생하는 기존의 과정을 렌즈어레이에 의해 형성된 기본영상을 직접 결상렌즈를 통하여 산란판(diffuser)에 결상시키는 과정으로 대치함으로써 해상도 문제에 의한 영향을 최소화하였다. 그리고 영상처리를 통한 실험에서의 경우와 같이 상대적으로 비교분석 하였다.

6.1. 기본영상 배열의 전체적 확대

기본영상 배열의 축소에 따른 재생상의 변화를 알아보기 위한 실험은 그림 8과 같이 렌즈어레이로부터 거리가 다른 세 개의 물체를 대상으로 실험하였고, 조명의 편의를 위해 조명된 물체들을 프레넬(fresnel)렌즈를 이용하여 렌즈어레이 앞에 결상한 후, 이를 실질적인 물체로 활용하였다. 이때 사용된 렌즈어레이는 크기가 1 mm, 초점거리는 1.5 mm인 기본렌즈가 정배열된 것을 사용하였다. 기본영상의 크기변환은 결상렌즈와 재생을 위한 산란판의 위치를 조절하여 구현하였다. 그림 9는 이때 사용된 물체사진으로 하트가 가장 뒤에 있고, 크로바가 그 앞에, 그리고 다이아몬드가 가장 앞에 놓여 있다. 그림 10은 기본영상 배열의 축소변환에 따른 실험 결과이다. 그림 10(a)는 기본영상 배열의 확대변환 전의 재생영상이고, 그림 10(b)는 기본영상 배열의 확대변환 후의 재생영

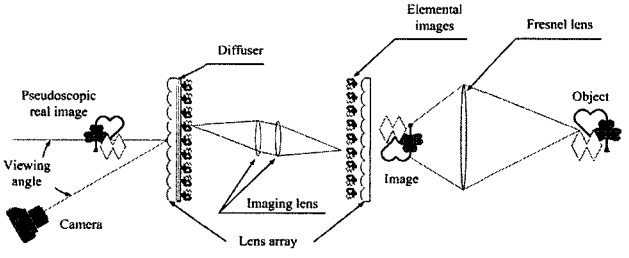


그림 8. 기본영상 배열의 크기변환에 따른 집적영상의 변화를 관찰하기 위한 실험 개념도.

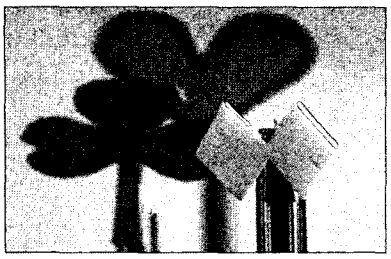


그림 9. 기본영상 배열의 크기변환에 따른 집적영상의 변화 실험에 사용된 물체.

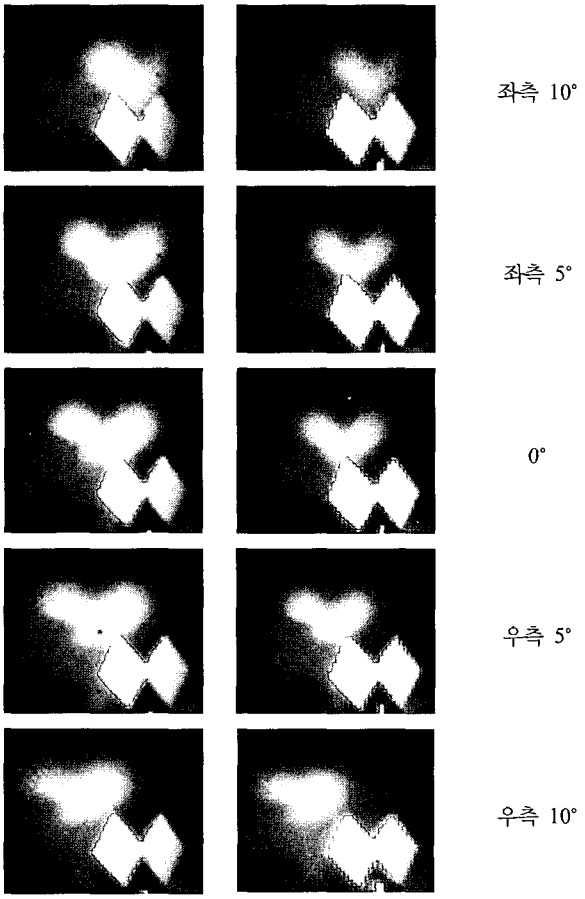


그림 10. 기본영상 배열의 전체적 크기변환에 따른 광실험 결과. (a) 기본영상 배열의 확대변환 전의 재생영상, (b) 기본영상 배열의 확대변환 후의 재생영상.

상이다. 이 때의 확대율은 이전 크기의 약 1%정도로 하였다. 그림 10(a), (b)의 위쪽에서부터 아래쪽으로 배열된 순서는 카메라가 재생시의 렌즈어레이에 대해 왼쪽에서부터 오른쪽으로 이동해 가며 찍은 재생상 사진들에 해당한다. 그림 10으로부터 알 수 있듯이 가장 렌즈어레이로부터 멀리 재생된 하트의 크기가 가장 많이 축소했으며, 다이아몬드의 크기변화보다는 크로바의 크기가 더 축소한 것을 알 수 있다. 그리고 그 크기가 작아진 만큼 보는 각도에 따른 해당 재생영상상의 임의의 점의 위치 변화가 작아짐을 알 수 있다. 즉 기본영상 배열의 전체적 확대변환에 대해서는 렌즈어레이로부터 멀리 재생된 영상일수록 그 크기와 깊이감이 더 민감하게 변하는 것을 알 수 있다.

6.2. 기본영상의 개별적 확대

실험 방법은 기본영상 배열의 전체적 크기 변화 실험의 경우와 유사하다. 단 여기서는 그림 11과 같이 기본영상의 개별적 확대를 위해 기본영상 형성 시 사용되는 렌즈어레이를 두 겹으로 하여 두 렌즈간의 거리를 조절하므로써 변화되는 등가 초점거리를 이용하여 기본영상의 확대율을 조절하였다. 그림 11에서 렌즈어레이 2를 렌즈어레이 1으로부터 멀리 띄우면(특정 영역 안에서) 가까이 있을 때 보다 등가 초점 거리가 짧아져 기본영상의 크기가 축소된다. 축소와 확대는 상대적인 개념이므로 그와 반대로 렌즈어레이 2와 렌즈 어레이 1 사이의 거리가 넓을 때 보다 좁을 때의 기본영상이 확대된 것으로 고려할 수 있다. 여기서는 편의상 렌즈어레이 사이의 거리를 좁힘으로써 기본영상을 확대한 경우로 고려하여 분석하였다. 이 때 사용된 렌즈어레이 1과 2는 기본렌즈 크기는 1 mm이고 초점거리 3.3 mm인 기본렌즈가 정배열 되어있는 렌즈어레이이며, 렌즈어레이 3은 크기가 1 mm, 초점거리는 1.5 mm인 기본렌즈가 정배열 되어있는 렌즈어레이이다.

사용된 물체는 그림 12와 같이 렌즈어레이에 가까이 있는 크로바와 렌즈어레이로부터 멀리 있는 하트를 물체로 사용하였다. 그리고 그림 13은 렌즈어레이 1과 2를 거쳐 생성된 기본영상들이다. 그림 13(b)는 그림 13(a)에 비하여 렌즈어레

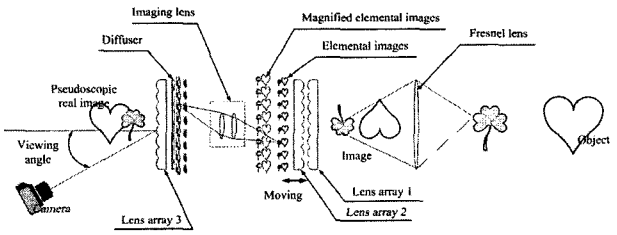


그림 11. 기본영상의 개별적 크기변환에 따른 집적영상의 변화를 관찰하기 위한 실험 개념도.

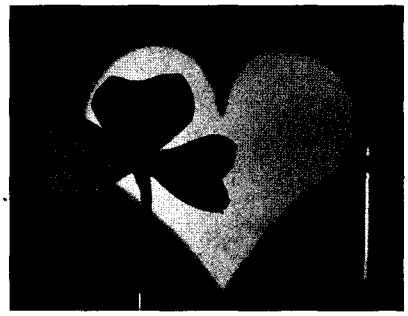
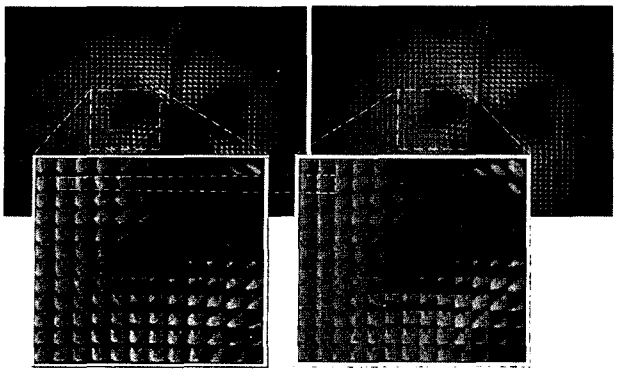
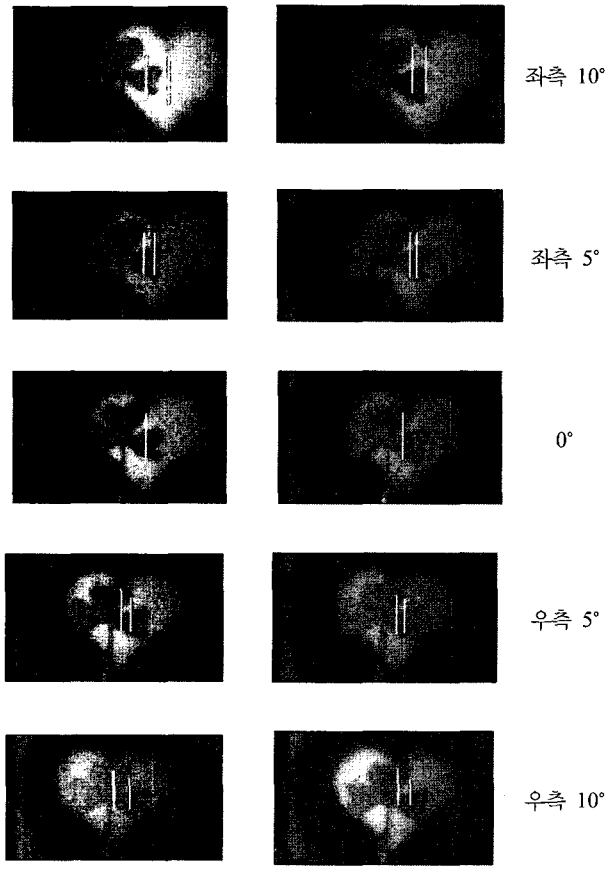


그림 12. 기본영상의 개별적 크기변환에 따른 집적영상의 변화 실험에 사용된 물체.



(a) (b)

그림 13. 기본영상의 개별적 확대. (a) 원본 기본영상과 (b) 개별적으로 확대된 기본영상.



(a) (b)

그림 14. 기본영상의 개별적 크기변환에 따른 광실험 결과. (a) 기본영상 배열의 확대변환 전의 재생영상, (b) 기본영상 배열의 확대변환 후의 재생영상.

이 2를 렌즈 어레이 1에 가까이 놓았을 때의 기본영상에 해당한다. 그림 6에서의 경우와 같이 그림 13(b)는 그림 13(a)의 기본영상이 개별적으로 확대된 영상과 같다. 재생은 전체적 확대 실험과 같이 도치 영상으로 재생하였으며, 그림 14는 이에 따른 실험 결과이다. 그림 14도 그림 13의 경우와 마찬가지로 위쪽에서부터 아래쪽으로 배열된 그림의 순서는 카메라가 재생시의 렌즈어레이에 대해 왼쪽에서부터 오른쪽으로 이동해 가며 찍은 재생상 사진들에 해당한다. 이론적인 결과에서와 같이 재생영상의 크기변화는 없는 것을 확인 할 수 있다. 그리고 그림 14에서 흰 선은 크로바와 하트의 상대적 이동에 대한 비교를 쉽게 할 수 있게 그려놓은 선이다. 그림 14에서 (a)의 영상과 (b)의 영상을 비교해 보면 같은 각도 변화에 대해 (b)의 영상이 (a)의 영상보다 상대적으로 덜 움직이는 것을 확인할 수 있다. 즉 기본영상의 개별적 크기 확대에 따라 깊이감이 작아지는 것을 알 수 있다. 그리고 이것은 크로바와 하트 사이의 거리가 좁아진 것에 해당하므로 재생영상의 깊이 방향 두께가 납작해 진 것 또한 확인할 수 있다.

VII. 결 론

최근 들어 집적결상법은 기존의 3차원 영상 재생방법들의 단점들을 획기적으로 넘어설 수 있을 것이라는 기대와 더불어 비상한 관심을 끌고 있다. 그러나 렌즈어레이 광학계에 대한 여러 가지 분석이 미진한 상태이다. 본 논문에서는 각 변수들의 다양한 변환에 따른 재생영상의 변화를 수학적으로 예측하고 증명할 수 있도록 집적이 이루어지는 조건으로부터 기본적인 몇 가지 변수들 간의 기하광학적 관계를 정리하였다. 그리고 기본영상 배열의 전체적 크기나 기본영상의 개별적 크기 변환을 가했을 때, 재생영상의 변화를 제시하고 실험을 통해 확인하였다. 기본영상 배열의 전체적 크기 변환은 재생영상에서 렌즈어레이로부터 멀리 떨어져 재생된 영상, 즉 깊이감이 큰 영상 일수록 확대 시에는 작아지는 쪽으로 축소 시에는 커지는 쪽으로 그 크기와 깊이감이 더 민감하게 변화하며, 기본영상의 개별적 크기변환은 재생영상의 깊이감에 관계없이 축소나 확대에 무관하게 그 크기는 변화가 없고, 그 깊이감만이 확대 시는 감소하는 쪽으로 축소 시는 커지는 쪽으로 확대율과 물체가 렌즈어레이로부터 떨어져 있는 거리, 즉 변환이 없을 때 재생되어야 할 깊이감에 비례해서 변화되는 것을 알 수 있었다. 이 결과는 최소한 집적결상계 구성시 또는 구성된 결상계의 정밀성 평가 및 보정에 도움이 될 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 대학 IT연구센터 육성 · 지원사업의 연구결과로 수행되었음.

참고문헌

[1] G. Lippmann, "La photographic integrale," *C. R Acad. Sci.* vol. 146, PP. 446-451, 1908.

[2] 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.

[3] Seung-Hyun Hong and Bahram Javidi, "Improved resolution 3D object reconstruction using computational integral imaging with time multiplexing," *Opt. Exp.* vol. 12, no. 19, pp. 4579-4588, 2004.

[4] H. Arimoto and B. Javidi, "Integral three-dimensional imaging with digital reconstruction," *Opt. Lett.* vol. 26, no 3, pp. 257-259, 2001.

[5] Seung-Ho Shin, Bahram 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.

[6] Jae-Hyeung Park, Sungyong Jung, Heejin Choi, and Byoungho Lee, "Viewing-angle-enhanced integral imaging by elemental image resizing and elemental lens switching," *Appl. Opt.* vol. 41, no. 32, pp. 6875-6883, 2002.

[7] Manuèl Martinez-Corral, Bahram Javidi, Raul Martinez-Cuenca, and Genaro Saavedra, "Integral imaging with improved depth of field by use of amplitude-modulated microlens arrays," *Appl. Opt.* vol. 43, no 31, pp. 5806-5813, 2004.

[8] Sung-Wook Min, Jisoo Hong, and Byoungho Lee, "Analysis of an optical depth converter used in a three- dimensional integral imaging system," *Appl. Opt.* vol 43, no. 23, pp. 4539- 4549, 2004.

[9] J.-H. Park, H. Choi, Y. Kim, J. Kim, and B. Lee, "Scaling of three-dimensional integral imaging," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 44, no. 1A, pp. 216-224, 2005.

[10] 박세희, 장재영, 서장일, 차성도, 신승호, "집적결상에서 기본영상의 변환이 재생상의 크기, 깊이감, 시야각에 미치는 영향," 한국광학회 2003년도 하계학술발표회, pp. 268-269, 2003.

Elemental image resizing and the analysis of the reconstructed three dimensional image in the integral imaging system

Jang Il Ser and Seung Ho Shin†

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

†*E-mail: shinsh@kangwon.ac.kr*

(Received February 11, 2005, Revised manuscript May 2, 2005)

In the integral imaging system for 3D display, the elemental image size is closely related to the several variables, such as the size of elemental lens, the distance between elemental lens and elemental image, etc., on the pick up system. We have analyzed the geometric relation between the variables. In addition, we have investigated the integrated image variation for the individual and whole conversion of the size of the elemental images, different from in pick up process, and presented experimental results.

OCIS Codes : 110.2990, 110.6890, 110.2960.