

## 동적 마이크로 렌즈 배열을 사용한 3차원 완전 결상에서의 해상도 개선 특성

조명진 · 김복수 · 장주석\*

부경대학교 전자컴퓨터정보통신공학부  
☎ 608-737 부산광역시 남구 대연3동 599-1

(2004년 2월 9일 받음, 2004년 3월 17일 수정본 받음)

3차원 완전 결상에서 동적 배열 렌즈 방식을 사용하여 해상도를 향상시킬 때, 해상도 향상 특성을 조사하였다. 렌즈 배열의 이동 방향 및 이동 거리에 따라 관측 해상도가 달라짐을 컴퓨터 합성 완전 결상을 이용하여 보였다. 이를 통해 효율적으로 관측 해상도를 향상시킬 수 있는 렌즈 배열의 이동 조건을 찾을 수 있다.

주제어 : integral imaging, moving array-lenslet technique.

### I. 서 론

3차원 디스플레이에 대한 연구는 주로 홀로그래피나 스테레오스코피(stereoscopy) 방식에 기초하여 오랫동안 연구되어 왔다.<sup>[1-3]</sup> 홀로그래피는 이상적인 3차원 디스플레이 방식이라고 여겨지나 코히어런트 광원이 필요하고, 먼 거리의 큰 물체를 기록하고 재생하는 것이 어렵다. 스테레오스코피 방식은 양안시차를 갖는 두 2차원 영상을 사람의 양쪽 눈에 각각 분리해서 보여줌으로써 입체감을 유발시킨다. 이 방식은 2개의 평면 영상을 사용하므로 구현이 간단하고 높은 해상도와 큰 깊이감을 갖는 3차원 영상을 디스플레이 할 수 있다. 그러나 스테레오스코피 방식에서는 수평시차만 있으며, 수평시차와 수직시차를 모두 갖는 3차원 영상의 구현은 어렵다. 그리고 영상을 보는 눈의 수렴각과 초점 사이에 불일치가 존재하여 시각 피로감이 커질 수 있다. 또한, 시점이 하나로 고정되어 있거나, 몇개로 고정되어 있어서(다시점 스테레오스코피방식의 경우) 불연속적이다.

최근 스테레오스코피 방식의 단점을 피하기 위해 완전 결상(Integral Imaging: II)에 대한 연구가 수행되고 있다. 이는 본래 완전 사진술(Integral Photography)이라는 이름으로 1908년 Lippmann에 의해 처음 제안된 것으로,<sup>[4-6]</sup> 디스플레이 패널과 CCD와 같은 광소자를 이용하여 실시간 완전 사진술을 구현하려는 것이다.<sup>[7,8]</sup> II는 연속적인 시점과 수평수직시차를 모두 갖는 영상을 구현할 수 있는 장점을 갖는다. 그러나 실용화를 제한하는 많은 문제들이 있는데, 예를 들면, 시야각이 좁고, 깊이감이 제한되어 있으며, 그리고 해상도가 낮다는 점이다.<sup>[9-11]</sup> 이러한 문제점을 극복하기 위해 최근 여러가지 개선책이 제안되고 실험된 바 있다.<sup>[12-17]</sup> 본 연구실에서는 특히 관측 해상도의 제한을 극복하기 위해, 동적 배열 렌즈 기법(Moving Array-Lenslet Technique)이 제안된 바 있는데,

이것은 렌즈 배열의 광선에 대한 공간 샘플링률을 시간 영역에서 높여줌으로써 관측 해상도를 높이는 것이다.<sup>[12]</sup> 그러나 기존의 연구에서는 렌즈 배열의 구체적인 움직임과 해상도 개선 사이의 분석이 없었다.

본 논문에서는 동적 렌즈 배열 방식에서 렌즈의 이동 형태에 따른 해상도 개선 특성을 자세히 조사하였다. 이를 위해 컴퓨터 합성 완전 결상(Computer-synthesized II)을 사용하여, 렌즈 배열의 몇 가지 이동 방향 및 이동 거리에 따른 관측 해상도의 성능 개선을 평가하였다. 이 평가를 통해 효율적인 이동 경로 조건을 찾을 수 있음을 보였다.

### II. 동적 렌즈 배열을 통한 관측 해상도의 개선

그림 1은 완전 결상의 픽업과 재생 원리를 나타낸다. 일반적으로 픽업과 재생에 핀홀 배열을 사용할 수 있지만 빛 사용을 높이기 위해 렌즈 배열을 사용하는 것이 보통이다. 3차원 물체가 렌즈(또는 핀홀) 배열로부터 어떤 거리만큼 떨어져 있다고 하자. 그림 1(a)에 나타난 것처럼, 렌즈(또는 핀홀) 배열에 있는 각각의 렌즈(또는 핀홀)는 이 3차원 물체로부터 오는 광선들의 방향과 세기 정보를 뒤에 있는 CCD와 같은 2차원 광감지기에 기록한다. 이 광선 정보는 3차원 물체에 대한 작은 영상과 같아서 이들을 요소 영상이라 부른다. 이 요소 영상들을 그림 1(b)에 나타난 것처럼, 액정 디스플레이(LCD)와 같은 2차원 디스플레이 패널에 표현하고, 픽업할 때와 동일한 형태의 렌즈 배열을 통해 재생하게 되면, 광선들이 공간에서 교차하면서 하나의 3차원 영상을 형성한다. 그림 1(b)에서 형성되는 실상은 깊이감이 반전된 역심(pseudoscopic) 실상이다. 그러나 각각의 요소 영상들을 중심을 원점으로 하여 각각 180°회전시켜 재생함으로써 정상적인 깊이감을 갖는 정심(orthoscopic) 허상을 얻거나 하나의 렌즈를 사용함으로써 정심 실상을 얻을 수 있다.<sup>[8,18]</sup> 요소 영상을 렌즈 배열을 통해 직접 얻지 않고, 컴퓨터로 합성하여 얻을 수

\*E-mail: jsjang@pknu.ac.kr

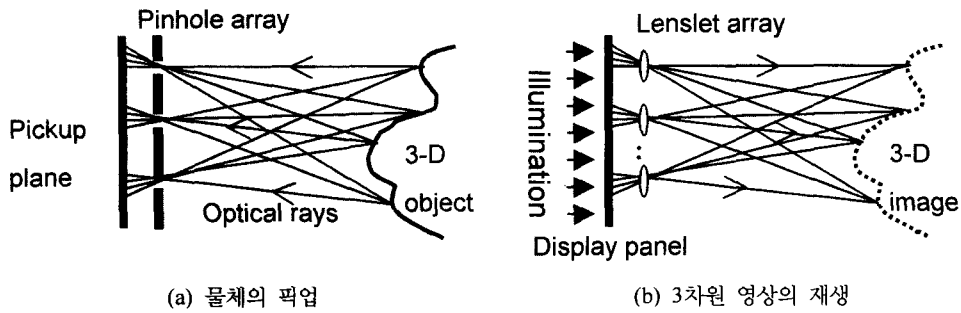


그림 1. 완전 결상의 원리.

있는데, 이를 컴퓨터 합성 또는 컴퓨터 발생 완전 결상이라 부른다.<sup>[9]</sup>

일반적으로 재생된 3차원 영상의 해상도는 여러 가지 시스템 파라미터에 따라 결정되는데, 예를 들면, 렌즈의 크기와 렌즈 배열의 주기, 그리고 CCD와 디스플레이 장치의 해상도 등이 있다. 본 논문에서는 모든 요소 영상들은 충분한 해상도를 가지고 픽업되고 디스플레이 된다고 가정하고 디스플레이 장치의 픽셀 수는 고려하지 않겠다. 대신 렌즈 배열의 유한 주기로 인한 해상도만 다룬다. 렌즈 배열의 주기가 유한하면 3차원 물체에서 유래되는 광선 정보에 대한 공간 샘플링률이 제한된다. 따라서 Nyquist 샘플링 이론으로부터 관측 해상도의 상한은 다음과 같이 주어진다.<sup>[9]</sup>

$$\beta_{nyq} = L/2p \tag{1}$$

여기서 단위는 사이클/라디안이고  $p$ 는 렌즈 배열의 주기이며,  $L$ 은 관찰 지점과 디스플레이 렌즈 배열 사이의 거리이다.  $p$ 를 너무 줄이면, 렌즈에서의 회절 때문에 해상도가 다시 나빠진다. 최적의 렌즈 크기는 대략 1 내지 2 mm라는 연구가 있었다.<sup>[6]</sup>

동적 배열 렌즈 방식에서는 요소 영상 검출 장치와 디스플레이 장치는 고정시켜 두고 렌즈 배열을 축면 방향으로 약간씩 움직여서, 주기  $p$ 보다 더 촘촘히 광선 정보를 추출하여 재생하는데 사용한다. 즉 렌즈 배열의 공간 샘플링률을 높이는 것이다. 렌즈 배열의 이동 속도는 사람의 눈의 잔상 효과의 감쇄 속도보다 충분히 빨라야 한다. 일반적으로 렌즈 배열이  $p$ 의 주기를 가지는 사각 격자 형태일 때, 공간 샘플링률을 증가시키기 위해서는 2차원 이동이 필요하다. 그러나 렌즈 배열은 주기적인 구조를 갖기 때문에, 그림 2에 나타난 것처럼 격자의 방향( $x$  및  $y$ 축 방향)과 각  $\theta$ 만큼 기울어진 방향으로 렌즈배열을 1차원 운동시켜도 2차원 격자 모두의 방향으로 공간 샘플링률을 높일 수 있다. 그림 2에서 속도  $V$ 를 가지고  $x'$ 축 방향으로 이동하여  $x$  격자 방향으로의 렌즈 배열의 속도성분은  $V \cos \theta \equiv V_x$ 이고,  $y$  격자 방향으로의 속도 성분은  $V \sin \theta \equiv V_y$ 이다. 픽업에서 렌즈 배열이 움직이면, 요소 영상도 움직인다. 2차원 광센서는 움직이는 요소 영상을 검출하고 이를 2차원 디스플레이 패널에 표현한다. 재

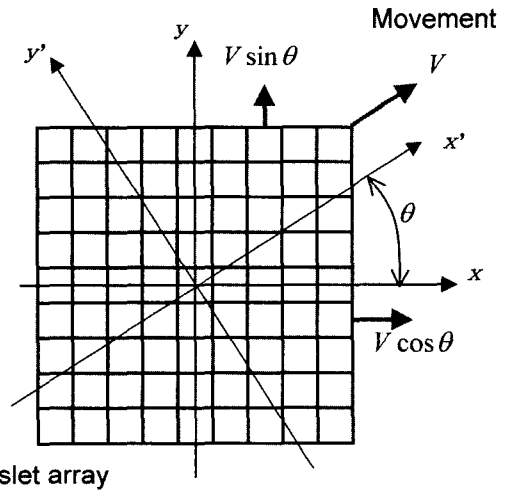


그림 2. 동적 배열 렌즈 방식에서의 렌즈 배열의 이동 방향.

생 렌즈 배열도 요소 영상과 동기시켜 움직여야 한다. 재생 3차원 영상의 해상도가 제대로 개선되기 위해서는 반응 속도가 충분히 빠른 광센서와 2차원 디스플레이 패널을 사용해야 한다.

렌즈 배열이 주기적인 구조이기 때문에, 요소 영상 패턴은 픽업 렌즈 배열이 움직임에 따라 시간 영역에서 반복된다. 그러므로 고정된 물체에 대해,  $V_x$ 와  $V_y$ 는 다음 조건을 만족해야만 한다.<sup>[14]</sup>

$$V_x = V \cos \theta > pS, \quad V_y = V \sin \theta > pS \tag{2}$$

여기서  $S$ 는 사람의 눈의 깜박임 융합 주파수(flicker fusion frequency)인 약 50Hz이다.

### III. 렌즈 배열의 이동 형태에 따른 관측 해상도의 개선 특성

#### 3.1. 실험 방법

이 실험에서 사용되는 렌즈 배열은 초점 거리가 약 2.9 mm이고, 렌즈의 주기가 1.08 mm인 53×53개의 사각형 렌즈로 이루어져 있다. 렌즈와 렌즈 사이의 간격은 7 μm 이하이다. 그

리고 요소 영상을 디스플레이 하기 위해서 투과형 흑백 LCD 패널을 사용하였다. 이 패널의 단위 픽셀 크기는  $36 \mu\text{m}$ 이고 해상도는  $1024 \times 768$ 이다.

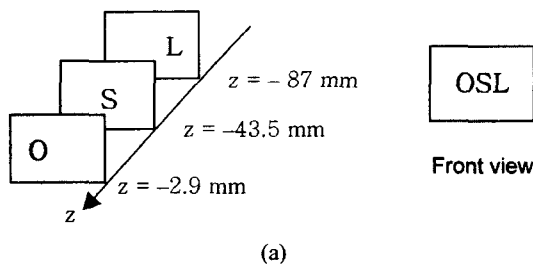
디스플레이 할 물체는 영문자 패턴 O, S, 그리고 L이다. 그림 3(a)에 나타난 것처럼, 이들 세 개의 문자들을 디스플레이 렌즈 배열로부터 각각 2.9 mm, 43.5 mm, 87 mm만큼 떨어진 곳에서 허상으로 디스플레이 시켰다. 모든 문자의 크기는 대략  $18 \text{ mm} \times 18 \text{ mm}$ 이다. 렌즈 배열과 디스플레이 패널 사이의 거리는 렌즈 배열의 초점 거리로 고정되어 있다. 실험의 편의를 위해 직접 픽업을 사용하지 않고 필요한 요소 영상을 컴퓨터로 합성하였다.

요소 영상을 계산하는 방법을 그림 3(b)에 나타내었다. 재생 렌즈 배열과 주기가 같은 가상의 픽업 배열을 설정하고 그 뒤  $z = -g$  지점에 가상의 픽업 평면(또는 나중에 3차원 재생시, 요소 영상을 디스플레이 하는 패널이 놓이는 곳)을 설정한다. 3차원 물체들을 디스플레이 하고자 하는 위치에 위치시킨다. 이들 물체로부터 나오는 가상의 광선을 핀홀을 통해 픽업 면에 사상시킨다. 디스플레이 할 영상이 허상이면(즉,  $z < 0$ 에 위치하는 영상이면) 반전 없이 영상의 크기만 축소하여 직접 픽업 면에 사상된다. 반면에 이것이 실상이면(즉,  $z > 0$ 에 위치하는 영상이면) 광선이 핀홀을 통과하여 사상되므로 요소 영상의 반전이 존재한다. 각 핀홀에서의 3차원 물체에 대한 픽업 각도  $\psi$ 는 핀홀의 주기와 핀홀과 픽업면과의 거리  $g$ 에 의해 결정된다. 따라서 물체 표면의 사상

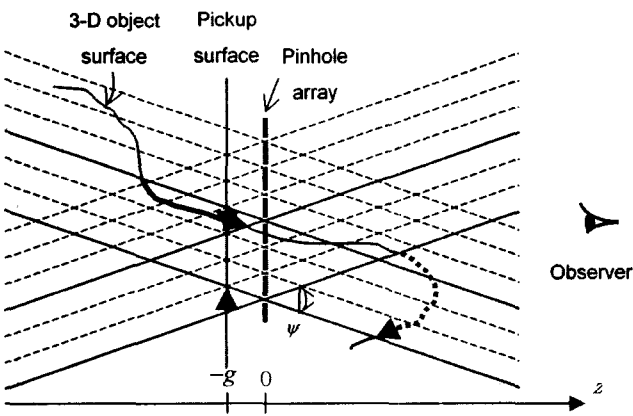
범위는 약  $pD/g$ 로서 물체 표면이 핀홀 배열에서 얼마나 떨어져 있는가에 따라 달라진다. 여기서  $p$ 는 핀홀의 주기이고  $D$ 는 3차원 물체와 핀홀 배열 사이의 거리이며,  $g$ 는 핀홀 배열과 픽업 평면사이의 거리로서 실제 실험에서는 대략 렌즈 배열의 초점 거리와 같도록 두었다. 앞쪽에 디스플레이 될 물체와 뒤쪽에 디스플레이 될 물체 사이에 겹치는 부분이 생기게 되면, 앞쪽 물체에 의해서 뒤쪽 물체가 일부 가려져야 한다. 따라서 여러 개의 물체를 픽업할 때에는 관측자의 눈에서 가장 뒤쪽에 디스플레이 되는 물체부터 차례대로 픽업하면서, 가까운 쪽을 픽업 결과를 덧씌우는 방법을 사용하여 겹치는 부분을 고려하였다. 사상되는 광선의 조밀도(요소 영상의 해상도)는 나중에 디스플레이 평면의 픽셀 개수와 일치하도록 조정하였다.

이와 같은 방식으로 모든 핀홀에 대해 광선을 사상시키면 전체 요소 영상을 얻을 수 있다. 그림 4는 렌즈 배열이 고정되어 있을 때, O, S, L의 세 가지 문자 패턴에 대한 요소 영상이다. LCD의 해상도가  $1024 \times 768$ 로 고정되어 있고 각 렌즈의 요소 영상의 해상도는  $30 \times 30$ 이므로, 실험에서 실제로 사용되는 렌즈 배열은  $34 \times 25$ 개의 렌즈이다. 따라서 전체 요소 영상의 해상도는  $1020 \times 750$ 이다. 그리고 전체 요소 영상을 LCD의 해상도와 같게 하기 위해, 공백을 추가하였다.

동적 렌즈 배열 기법을 적용하는 방법은 다음과 같다. 우선, 재생 렌즈 배열(픽업을 위한 핀홀 배열)이  $x-y$  평면에서 이동할 경로를 결정한다. 픽업 평면과 3차원 물체는 고정시켜 두고, 이동 경로를 따라 핀홀의 위치를 원하는 만큼  $x-y$  평면에서 이동시킨 다음, 앞에서 요소 영상을 구하는 과정을 반복한다. 이렇게 구한 요소 영상들은 각각 그림 4와 유사하지만 각각의 세부 영상은 조금씩 다르다. 이렇게 생성된 여러 장의 전체 요소 영상을 컴퓨터에 저장해 둔다. 3차원 영상을 재생할 때, 재생 렌즈 배열도  $x-y$  평면의 동일 경로를 따라 움직인다. 특정 위치에 렌즈 배열이 오면 그 위치에 대응하는 요소 영상을 디스플레이해 준다. 즉 재생 렌즈 배열의 이동 경로에 따라 올바른 요소 영상을 동기시켜 디스플레



(a)



(b)

그림 3. 실험에서 사용한 물체 (a)와 컴퓨터 합성을 통한 요소영상의 계산 방법 (b).

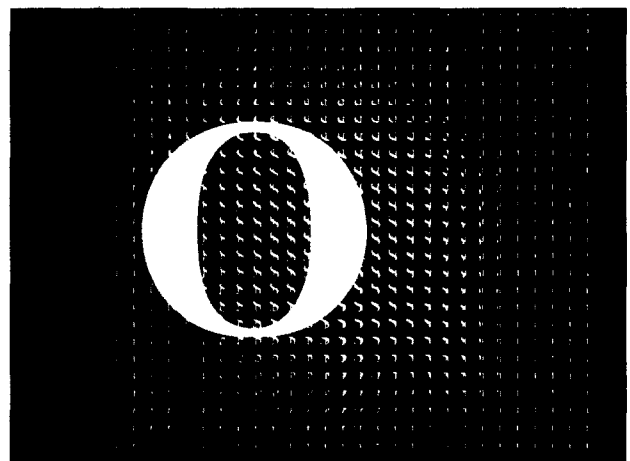


그림 4. 특정 렌즈 배열의 위치에서 계산된 요소 영상

이 패널에 나타내는 것이다. 이 때 디스플레이 되는 3차원 영상이 관측자의 눈에 연속적으로 보이기 위해서는 식 (2)에 나타낸 것과 같이 충분히 빠른 속도로 렌즈 배열을 움직이고 요소 영상도 이에 따라 충분히 빨리 표현되어야 한다. 하지만 본 실험에서 사용하는 장치가 이러한 속도를 쫓아 갈 수 없어서, CCD 카메라로 재생되는 3차원 영상을 기록하고 이들을 컴퓨터에서 평균함으로써 눈의 잔상 효과를 시뮬레이션 하였다. 이 때 CCD 카메라에 사용된 렌즈는 초점거리가 50 mm인 렌즈이고, 조리개 직경을 3 mm( $f/\# = 16$ )로 하였다. 조리개의 직경이 클수록 렌즈 배열에 의한 광선 정보의 샘플링 폭이 증가하는 효과가 있어서 해상도가 증가하게 된다.<sup>[12]</sup> 하지만, MALT 방식에서 해상도 개선의 효과를 잘 나타내기 위해 조리개의 크기를 최소화하여 실험을 수행하였다.

동적 렌즈 배열 방식을 적용하기 위한  $x$ - $y$  평면에서의 이동 형태는 선형, 원형 등이었다. 특히 선형 이동을 할 경우에는 렌즈 배열의 격자 방향과 이동 방향을 각  $\theta$ 와 이동 거리를 여러 가지로 바꾸어서 실험하였고 이에 따른 해상도 개선 효과를 조사하였다.

### 3.2. 실험 결과

동적 렌즈 배열 방식을 적용하지 않고, 그림 4의 요소 영상을 사용하여 재생 렌즈 배열을 통해 디스플레이 하면 그림 5와 같은 해상도가 낮은 3차원 영상을 얻게 된다. 그림에서 볼 수 있듯이 관측 해상도는 렌즈 배열의 주기와 동일한 공간 샘플링 주기에 의해 결정됨을 알 수 있다.

만약 렌즈 배열을 수직 방향(그림 2에서  $y$ 축 방향 또는  $\theta = 90^\circ$  방향)으로 이동시키면 하나의 축에 대해서만 관측 해상도가 향상된다. 전체 렌즈 배열이 이동하면 각각의 렌즈에서도 동일한 운동이 형성된다. 그림 6(a)는 렌즈 하나의 크기만큼 해당하는 영역에 대해서, 이동 경로와 샘플링 위치를 나타낸 것이다. 렌즈 하나에 해당하는 요소 영상의 화소 수가  $30 \times 30$ 이므로 이를 또한 격자로 나타내었다. 광선 샘플링이 발생하는 위치는 각 렌즈의 중심이 된다. 이 샘플링 위치를 사각형의 검은 색 점으로 표기하였다. 샘플링 간격은 요소 영상의 화소 크기로 양자화되었기 때문에 사각형 검은 색 점은 디스플레이 패널에 있는 화소 1개의 크기와 같도록 나

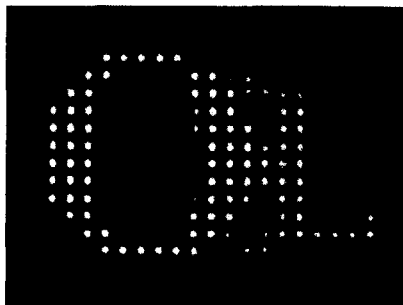


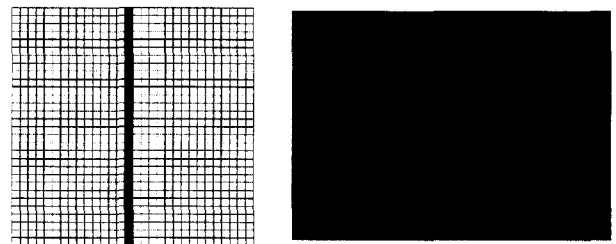
그림 5. 동적 렌즈 배열 기법을 적용하지 않았을 때의 재생 3차원 영상

타내었다. 렌즈가 이동하여 샘플링 위치가 바뀔 때 마다 새로운 검은 색 점을 표기하였다. 그림 6(a)에서 검은 색 점들이 선으로 나타난 것은 샘플링 간격과 디스플레이 패널의 화소 간격( $36 \mu\text{m}$ )이 같기 때문이다. 이러한 경우의 재생 영상을 그림 6(b)에 나타내었다. 30회의 샘플링이 이루어졌으므로, 그림 6(b)는 이 30개의 재생 3차원 영상을 평균한 것이다. 예상대로  $y$ 축 방향으로만 해상도가 향상된다는 것을 알 수 있다.

재생된 3차원 영상의 밝기는 이를 촬영하는 카메라 렌즈의 조리개 크기에 의해 좌우된다. 조리개 상태를  $f/\#$ 가 16이 되도록 하였기 때문에 상이 어두워진 것이다. MALT 되지 않은 3차원 영상의 경우도 밝기의 변화가 큰 것일 뿐, 평균 밝기는 MALT 후의 영상과 동일하다.

$x$ 축과  $y$ 축 모두의 방향으로 해상도를 높이기 위해, 렌즈 배열의 이동 방향을  $x$ 축에서  $\theta$ 만큼 기울어진 방향으로 선형 이동시키는 실험을 수행하였다. 그림 7(a)는  $\theta = 45^\circ$ 일 때의 이동 경로와 샘플링 위치를 나타낸 그림이고, 그림 7(b)는 그 때의 재생 영상이다. 흥미롭게도 대각선 방향으로만 해상도가 개선됨을 알 수 있다. 이는 샘플링 폭이 좁고 공간적인 광선 샘플링 위치가 공간에서 균일하게 분포하고 있지 못하기 때문이다. 이러한 문제는,  $\theta = 45^\circ$ 가 아닌 방향, 한 가지를 들어, 그림 7(c)에 나타낸 것과 같이  $\theta = 18^\circ$ 인 방향으로( $d = 3.16p$ )거리만큼 이동함으로써 완화시킬 수 있다.

렌즈들이 주기적으로 위치하고 있으므로, 이동 거리가 한 주기 이상이 되면 이웃 렌즈에 의해서 샘플링 되는 지점과 중복이 될 수 있다. 다른 이웃 렌즈 들에 의한 샘플링을 중첩시켜 그림 7(c)의 이동 경로와 샘플링 지점을 하나의 렌즈 내부에서 등가적으로 표현하면, 그림 7(d)와 같다. 즉, 이 경우 하나의 렌즈 영역에 대해 등가적으로 골고루 샘플링을 하는 형태가 되므로 관측 해상도가 향상된다. 이 실험에서도 전체 샘플링 회수는 30회로 하였다. 그림 7(e)는 재생된 영상의 사진이다. 이로부터, 효율적인 해상도 개선을 위해서는 광선 샘플링을 하는 지점이 균일하게 분포하고 충분히 촘촘하도록 렌즈 배열을 움직여야 함을 예측할 수 있다. 일반적으로 각 배열 렌즈들에 의한 샘플링이 공간적으로 중복되지 않기 위한 최적 이동 조건은 주어진 이동거리에 대해 다음과 같이 주어진다.



(a) 수직 이동 경로 및 샘플링 위치 (b) 재생된 3차원 영상

그림 6. 동적 렌즈 배열 기법을 적용한 예.

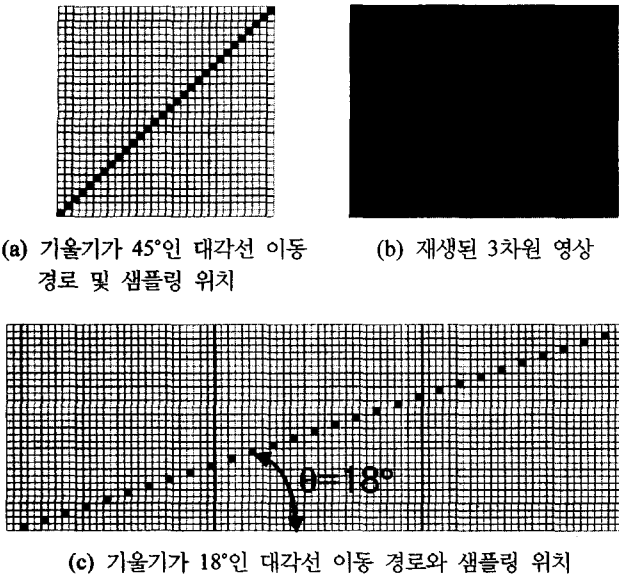


그림 7. 동적 렌즈 배열 기법을 적용한 예.

$$\theta = \arctan(1/n); \quad d = p(1+n^2)^{1/2} \quad (3)$$

여기서  $n$ 은 수평적으로 이동되는 거리를 렌즈 주기의 배수로 나타낸 정수이고  $\theta$ 는 수평축과 이동하는 방향과의 각이다. 기존의 동적 렌즈 배열 연구에서 시스템 구현의 편의상 회전 이동이 제안된 바 있다.<sup>[12,14]</sup> 기계적으로 렌즈 배열을 움직일 경우, 무한히 한쪽 방향으로의 선형 이동을 할 수가 없고 반드시 반대 방향의 이동이 요구된다. 운동 방향이 바뀌는 순간, 렌즈 배열은 머무르게 되고 해상도 개선은 이순간 이루어지지 않는다. 따라서 원형 이동과 같이 머무르는 순간이 없는 운동이 바람직하다. 그러나 원형 이동을 할 경우, 회전 반경  $r$ 을 렌즈 배열의 반주기  $p/2$ 의 정수배로 하는 것은 바람직하지 못하다. 이것은 샘플링의 위치를 균일하게 분포시키지 못하기 때문이다. 이를 확인하기 위해, 그림 8(a)와 같이 회전 반경이  $p/2$ 인 원과 유사한 모양으로 샘플링을 하였다. 모두 96회의 샘플링을 하였음에도 불구하고, 그림 8(b)와 같이 해상도의 개선이 불충분하였다. 원과 비슷한 운동을 할 경우에도 유사한 결과가 얻어졌다. 이것은 좌우 상하 변에 가까운 곳에서의 샘플링은 서로 중복된 샘플링이기 때문이다. 이러한 중복을 가급적 줄이고 공간에서 균일한 간격으로 샘플링을 하려면, 회전 반경을 다음과 같이 선택하는 것이 바람직하다.

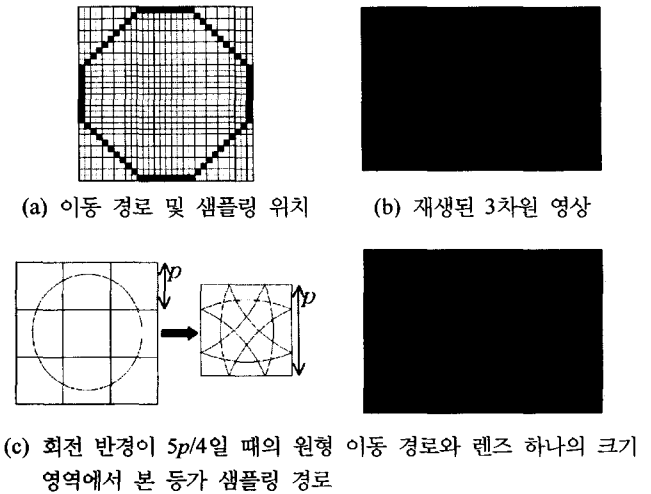


그림 8. 동적 렌즈 배열 기법을 적용한 예.

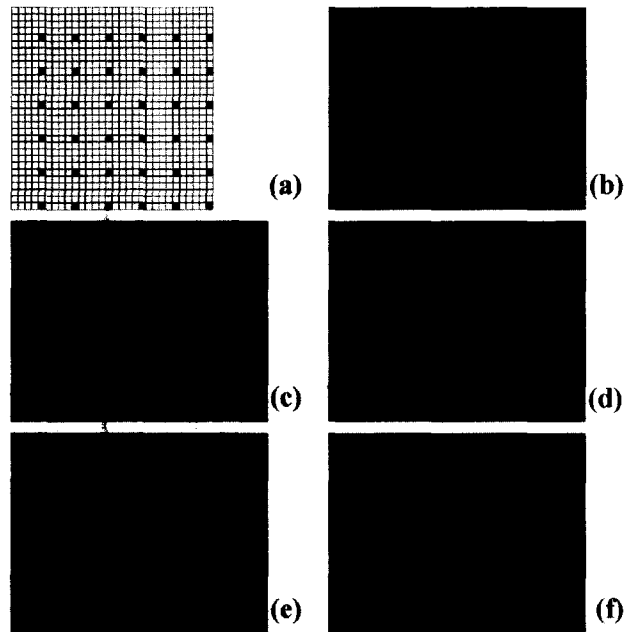


그림 9. 동적 렌즈 배열 기법을 적용한 예. (a) 균일 분포 샘플링의 예. 이는 사각 나선 회전 이동 경로 또는 사각 지그재그 이동 경로로 볼 수 있다. (b)-(f) 여러 방향에서 바라 본 재생된 3차원 영상.

$$r = np/2 + p/4 \quad (4)$$

여기서  $n$ 은 0을 포함한 자연수이다. 그림 8(c)에  $n=2$ 인 경우를 예를 들었다. 그 결과, 그림 8(d)와 같이 해상도의 개선 효과를 볼 수 있었다.

앞의 실험에 근거하여 볼 때, 그림 9(a)가 가장 이상적인 샘플링 위치라고 할 수 있다. 사실 이것은 그림 7(c)[또는 7(e)]와 거의 유사한 형태이다. 이러한 운동은 사각 나선 또는 사각 지그재그 이동 모습이라 할 수 있다. 이러한 이상적

인 샘플링 분포의 경우 해상도의 개선특성을 조사해 보았다. 36회 샘플링을 수행하고 각 경우의 재생 영상을 평균하였을 때 얻은 3차원 영상을 여러 가지 각도에서 본 모습을 그림 9(b)-(f)에 각각 나타내었다. 동적 렌즈 배열을 사용하되, 샘플링 분포가 균일하여야 해상도가 충분히 개선될 수 있음을 알 수 있다. 렌즈 배열을 전자적으로 합성하고 그 움직임도 전자적으로 제어한다면 렌즈 배열의 움직임은 다양하게 실현될 수 있다.<sup>[20]</sup> 이 경우, 렌즈 배열의 무한 선형 운동을 할 수 있고, 그림 7(e)에서 볼 수 있는 것처럼  $x$  및  $y$ 축 방향으로의 샘플링률을 높이려면 각  $\theta$ 를 작게 하고 충분히 촘촘히 샘플링하면서 렌즈 배열을 움직이면 된다.

### V. 결 론

지금까지 완전 결상에서 관측 해상도를 향상 시킬 수 있는 동적 렌즈 배열에 대해 자세히 분석해 보았다. 컴퓨터 합성 완전 결상에서도 동적 렌즈 배열을 적용할 수 있으며 여러 가지 렌즈 배열의 움직임과 방향에 따라 해상도의 개선이 달라짐을 확인 하였다. 렌즈 배열의 주기가 충분히 작지 않을 때에는  $\theta=45$ 도로 한 주기 거리의 선형 이동은 바람직 하지 않으며, 공간 샘플링 율을 높이기 위해서는  $\theta$ 를 작은 각도로 하여 여러 렌즈 주기에 걸쳐 이동하여야 함을 알 수 있었다. 그리고 원형 운동을 할 경우에는 회전 반경을 임의로 하는 것보다 렌즈 배열 주기의  $\frac{1}{4}$ 의 홀수배 (즉,  $p/4, 3p/4, 5p/4, \dots$ )가 되는 것이 유리함을 알 수 있었다. 아직까지는 사용되는 디스플레이 패널이나 CCD 센서들의 프레임 속도가 제한되어 있어서 실시간 실험을 수행하는 것이 불가능하나, 고속 디스플레이가 개발된다면 향상된 해상도를 가진 완전 결상을 실시간으로 재생할 수 있을 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 2003년 부경대학교 발전기금 연구지원에 의해 수행되었으며, 지원에 감사 드린다.

### 참고논문

[1] S. A. Benton, ed., *Selected Papers on Three-Dimensional Displays*(SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, WA, 2001).  
 [2] D. H. McMahon, H. J. Caulfield, A technique for producing wide-angle holographic displays, *Appl. Opt.*, vol. 9, no. 1, 91-96, 1970.  
 [3] T. Okoshi, Three-dimensional display, *Proc. IEEE*, vol. 68, 548-564, 1980.  
 [4] G. Lippmann, La photographie integrale, *C.R. Acad. Sci.*, vol. 146, pp. 446-451, 1908.  
 [5] H. E. Ives, Optical properties of a Lippmann lenticulated

sheet, *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 21, 171-176, 1931.  
 [6] C. B. Burckhardt, Optimum parameters and resolution limitation of integral photography, *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 58, 71-76, 1968.  
 [7] F. Okano, H. Hoshino, J. Arai, and I. Yuyama, Real-time pickup method for a three-dimensional image based on integral photography, *Appl. Opt.*, vol. 36, no. 7, 1598-1603, 1997.  
 [8] F. Okano, H. Hoshino, J. Arai, and I. Yuyama, Three-dimensional video system based on integral photography, *Opt. Eng.*, vol. 38, no. 6, 1072-1077, 1999.  
 [9] 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.  
 [10] 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, 5217-5232, 2001.  
 [11] J.-S. Jang, F. Jin, and B. Javidi, Three-dimensional integral imaging with large depth of focus using real and virtual image fields, *Opt. Lett.*, vol. 28, no. 16, pp. 1421-1423, 2003.  
 [12] J.-S. Jang and B. Javidi, Improved viewing resolution of three-dimensional integral imaging with nonstationary micro-optics, *Opt. Lett.*, vol. 27, no. 5, pp. 324-326, 2002.  
 [13] 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.  
 [14] J.-S. Jang and B. Javidi, Improvement of viewing angle in integral imaging by use of moving lenslet arrays with low fill factor, *Appl. Opt.*, vol. 42, no. 11, 1996-2002, 2003.  
 [15] S. Jung, J.-H. Park, H. Choi, and B. Lee, Wide-viewing integral three-dimensional imaging by use of orthogonal polarization switching, *Appl. Opt.*, vol. 42, no. 14, pp. 2513-2520, 2003.  
 [16] 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, 1481-1482, 2001.  
 [17] J.-S. Jang and B. Javidi, Large depth-of-focus time-multiplexed three-dimensional integral imaging using lenslets with non-uniform focal lengths and aperture sizes, *Opt. Lett.*, vol. 28, no. 20, 1924-1926, 2003.  
 [18] J.-S. Jang and B. Javidi, Formation of orthoscopic three-dimensional real images in direct pickup one-step integral imaging, *Opt. Eng.*, vol. 42, no. 7, 1869-1870, 2003.  
 [19] Y. Igarishi, H. Murata, and M. Ueda, 3D display system using a computer-generated integral photograph, *Japanese J. Appl. Phys.*, vol. 17, 1683-1684, 1978.  
 [20] J.-S. Jang, and B. Javidi, Three-dimensional integral imaging with electronically synthesized lenslet arrays, *Opt. Lett.*, vol. 27, no. 20, 1767-1769, 2002.

**Properties of resolution improvement for three-dimensional integral imaging using dynamic microlens array**

Myungjin Cho, Fushou Jin, and Ju-Seog Jang<sup>†</sup>

*Division of Electronics, Computers and Telecommunication Engineering,  
Pukyong National University, Busan, 608-737, KOREA*

<sup>†</sup>*E-mail: jsjang@pknu.ac.kr*

(Received February 9, 2004, Revised manuscript March 17, 2004)

We investigate characteristics of viewing resolution improvement in three-dimensional integral imaging, when a dynamic lens array method is adopted. We show that the viewing resolution changes for different moving directions and distances of the lens array through computer-synthesized integral imaging. From this study, optimal moving conditions of the lens array for efficient viewing resolution improvement can be determined.

OCIS Codes : 110.6880, 110.4190, 100.6890.