

3차원 영상 재생을 위한 집적결상법에서 기본영상 재조합을 통한 재생영상의 깊이 변환

서장일 · 신승호[†]

강원대학교 물리학과

Ⓣ 200-701 강원도 춘천시 효자 2동 192-1

(2006년 12월 20일 받음, 2007년 1월 24일 수정본 받음)

3차원 영상 재생을 위한 집적결상법에서 기본영상의 재조합을 통한 재생영상의 깊이변환에 관하여 연구하였다. 렌즈 배열 또는 카메라 배열 등을 통하여 획득된 영상 배열을 적절한 조건 하에서 재조합하여 재생함으로써 재생영상의 깊이에 대해 도치(pseudoscopic) 영상 또는 정치(orthoscopic) 영상, 허상, 실상 뿐만 아니라 임의의 깊이로의 왜곡 없는 변환이 가능하다. 본 논문에서는 각 변환에 대한 재조합 조건을 이론적으로 유도하고 실험을 통하여 확인하였다.

주제어 : Integral imaging, Elemental image recombination, 3D display

I 서 론

집적결상법은 1908년 Lippmann에 의해 처음 고안되었는데,^[1] 2차원 영상 재생 판넬의 발전이나 특별한 광학적 방법을 통해 기본영상이 충분한 해상도를 가질 수 있을 경우, 풀패럴랙스(full parallax), 풀칼라(full color), 연속시점 등을 제공하는 가장 이상적인 3차원 영상 구현 방법이다. 이러한 집적결상법은 광선 편향을 통한 시점 분할의 개념으로 다루어지는 다른 방식들과는 달리 3차원적 결상으로써 이론적 접근을 통하여 연구되어왔다. 이러한 효율적 접근과 이상적인 3차원 영상 구현이라는 기대와 더불어 기본영상의 변환을 통한 재생영상의 변화나 중복 및 누락 등 집적결상계의 특성 뿐만 아니라 시야각 문제, 재생영상의 깊이 문제 등 집적결상법이 갖는 여러 문제들에 대한 연구가 최근 활발히 진행되어 왔다.^[2-6] 특히 3차원 영상이 기존의 2차원 영상과 달리 깊이 차원이 부가되어 재생된다는 점에서 그 의미를 갖는 만큼 재생영상의 깊이에 관한 연구가 매우 중요하다. 집적결상법이 갖는 깊이에 관한 문제는 깊이가 뒤바뀌어 재생되는 도치 재생에 관한 문제가 있다. 집적결상법에서의 3차원 물체를 렌즈 배열을 통하여 기본영상들로 결상하여 획득하고 결상된 기본영상에 아무런 변환을 가하지 않고 렌즈 배열을 통하여 재생하였을 경우, 기본영상 획득 시 렌즈 배열로부터 물체거리에 해당하는 깊이로 재생 영상의 깊이가 설정되어 도치 영상으로 재생된다. 이에 따라 깊이가 정상적인 순서를 갖는 정치영상으로 재생되게 하기 위하여 다음과 같은 여러 연구들이 진행되었다.

재생영상의 깊이 순서 변환은 기본적으로 각 기본영상을 기본렌즈의 중심을 원점으로 180도 회전시키는 변환을 통해 가능하다. 이와 같은 회전을 기본영상 획득 시 두 개의 렌즈

배열을 통하여 회전된 기본영상을 얻는 방법,^[7] 그린(GRIN) 렌즈 배열을 통하여 기본영상을 얻는 방법,^[8] 볼록거울과 빔살가르개(beam splitter)를 통하여 얻는 방법,^[9] 오목렌즈 배열을 통하여 획득하는 방법^[10] 등이 제시된 바 있다. 그러나 이와 같은 방식들의 경우, 재생 영상이 반드시 허상이어야 한다는 제약이 있다. 이에 따라 1단계로 기본영상을 이용하여 집적영상을 재생하고 재생된 영상을 대상으로 다시 기본영상을 재획득하여 재생시킴으로써 정치 실상을 재생할 수 있는 방법이 연구되었다.^[11] 집적결상법에서 깊이 조절에 관한 연구로는 기본영상 획득 및 재생으로 결정되는 깊이를 기본영상의 획득 방법을 통하여 조절할 수 있는 방법들이 연구되었다. 깊이 조절 방법으로써 기본영상 획득 시 물체에 대한 상을 결상한 후 렌즈 배열을 통하여 기본영상을 획득 하는 깊이조절렌즈(depth-control lens)를 사용하는 방법,^[12] 큰 구경의 오목 렌즈 또는 휘어진 렌즈 배열을 사용하여 기본영상을 획득 하는 방법^[13] 등이 있다. 그러나 이 같은 방법들의 경우, 기본영상 획득 시 깊이가 결정되며 재생영상의 깊이 및 크기에 왜곡이 생긴다는 단점이 있다. 깊이 조절의 다른 방법으로 기본영상의 크기 변환을 통한 것도 가능하다.^[3,13,14] 그러나 이 방법 또한 비율적 깊이 조절이기 때문에 깊이 별로 각기 구분된 비율을 적용하지 않는 이상 재생영상의 왜곡은 피할 수 없다.

본 논문에서는 집적결상법에서 렌즈 배열을 통해 획득된 기본영상을 재조합하여 재생함으로써 광학적 손실이나 재생영상의 왜곡 없이 도치상, 정치상, 실상, 허상 뿐만아니라 임의의 깊이로의 변환까지 가능한 방법에 대해 연구하였다. 기본영상의 재조합은 각 깊이 변환에 있어 적절한 조건을 따라야 하는데, 각 조건들에 대해 이론적으로 유도하고 실험을 통해 확인하였다.

[†] E-mail: shinsh@kangwon.ac.kr

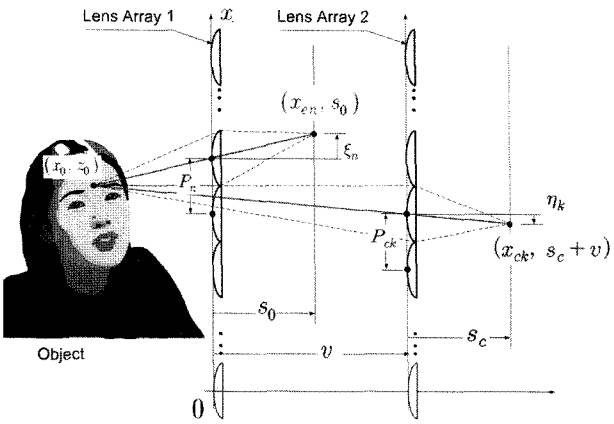


그림 1. 기본영상 획득 시 물체로부터의 거리가 v 만큼 차이 나는 두 렌즈 배열에서 점 물체와 이에 대한 기본영상 상의 대응점 사이의 대응관계.

II. 재생영상의 깊이 변환을 위한 기본영상 재조합 조건

집적결상법에서 재생영상의 깊이는 기본영상 획득 시 물체와 렌즈 배열사이의 거리에 의해 결정된다. 따라서 다른 깊이를 갖는 재생영상을 위한 기본영상의 형태는 물체로부터 다른 거리에 있는 렌즈 배열에 의해 획득된 형태를 가져야 한다. 본 연구는 물체로부터 임의의 거리에 있는 렌즈 배열을 통하여 획득된 기본영상들을 재조합하여 다른 거리를 갖는 렌즈 배열을 통해 획득될 기본영상들을 만드는 것이다. 그림 1은 기본영상 획득 시 물체로부터 v 만큼 다른 거리를 갖는 두 렌즈 배열에서 점 물체와 이에 대한 기본영상 상의 대응점 사이의 대응관계에 대한 그림이다. 렌즈배열1에서 n 번째와 $n-1$ 번째 기본렌즈사이의 거리를 P_n , 렌즈배열1로부터 기본영상면까지의 거리를 s_0 , 좌표 (x_0, z_0) 를 갖는 점 물체에 대해 n 번째 기본렌즈에 의해 결상된 기본영상 상의 대응점의 x 방향의 위치를 x_{en} , n 번째 기본렌즈의 중심을 기준으로 한 대응점의 위치를 ξ_n , 렌즈배열2에서 k 번째와 $k-1$ 번째 기본렌즈사이의 거리를 P_{ck} , 렌즈배열2로부터 기본영상면까지의 거리를 s_c , 점 물체에 대해 k 번째 렌즈에 의해 결상된 대응점의 x 방향의 위치를 x_{ck} , k 번째 기본렌즈의 중심을 기준으로 한 대응점의 위치를 η_k 라고 할 때, 기본영상 획득 시의 렌즈배열1과 렌즈배열2의 n 번째와 k 번째 기본렌즈에 의해 결상된 각각의 대응점과 점 물체 사이의 대응관계는 각각 다음과 같다.

$$\xi_n = -\frac{s_0}{z_0} \sum_{i=0}^n P_i + \frac{x_0 s_0}{z_0} \quad (1)$$

$$\eta_k = -\frac{s_c}{z_0 - v} \sum_{i=0}^k P_{ci} + \frac{x_0 s_c}{z_0 - v} \quad (2)$$

식 (1)과 (2)는 1차 함수로써 나머지 변수들이 x_0 와 z_0 에

독립적이므로 x_0 와 z_0 는 대응관계인 직선상의 모든 점이 될 수 있다. 따라서 한 대응점에는 대응관계선 상의 모든 물체 정보가 축퇴되어 있다. 실제로 렌즈 배열에 가까운 물체 점에 의해 먼 거리의 물체 점의 정보가 가려질 수 있으나 논의의 단순화를 위하여 이 경우는 편의상 본 논의에서 제외하였다. 기본영상 상의 모든 점들은 기본영상 획득 시의 각 대응관계들에 해당하므로 기본영상에 관한 모든 논의는 대응관계를 통하여 이루어져야 한다.

만약 렌즈배열들 간에 v 만큼의 거리차이가 있음에도 불구하고 대응관계선이 일치하는 해당 기본영상 상의 점이 있을 경우, 서로 간에 교환이 가능함을 의미하며, 그 일치 조건이 기본영상 재조합 시 점의 선택 및 배치 조건이 된다. 두 대응관계가 서로 일치할 조건은 두 대응관계선상의 모든 물체 정보, 즉, 모든 x_0 와 z_0 에 대해 두 대응관계가 항상 성립할 조건에 해당한다. 식 (1)과 (2)가 모든 x_0 에 대해 성립할 조건, 즉, x_0 에 독립적으로 성립할 조건은 다음과 같다.

$$0 = z_0 \left(\frac{\eta_k}{s_c} - \frac{\xi_n}{s_0} \right) - \frac{\eta_k v}{s_c} + \sum_{i=0}^k P_{ci} + \sum_{i=0}^n P_i \quad (3)$$

그리고 식 (3)이 z_0 에 대해 독립적으로 성립하기 위한 조건들은 다음과 같다.

$$0 = -\frac{\eta_k v}{s_c} + \sum_{i=0}^k P_{ci} - \sum_{i=0}^n P_i \quad (4)$$

$$\frac{\eta_k}{s_c} = \frac{\xi_n}{s_0} \quad (5)$$

식 (4)에서 k 가 고정되고 P_{ci} 와 P_i 가 η_k 와 무관한 값을 가질 경우, η_k 는 n 과 대응된다. 따라서 렌즈배열2에 의해 결상될 기본영상들을 렌즈배열1에 의한 기본영상들로부터 재조합하는 경우, 식 (4)로부터 재조합될 k 번째 기본영상 상의 η_k 위치를 가져야 할 점은 그에 대응되는 n 번째 기본영상에서 식 (5)의 조건이 성립되는 위치 ξ_n 에 있는 점이 된다. 그리고 식 (4)에서 n 이 고정되고 P_{ci} 와 P_i 가 η_k 와 무관한 값을 가질 경우, η_k 는 k 와 대응되어 k 값에 의해 η_k 가 결정된다. 이에 따라 재조합 시 η_k 에 위치할 점은 식 (5)에 의해 결정될 ξ_n 위치의 점이 된다. 이 조건들은 두 기본영상 상의 점들 간의 대응조건이므로 렌즈배열2에 의한 기본영상들로부터 렌즈 배열 1에 의한 기본영상으로의 재조합을 위한 조건으로도 성립된다.

식 (4)에서 고정된 k 에 대해 여러 값의 n 이 대응될 수 있는데, 렌즈배열 2에 의한 기본영상으로의 재조합인 경우, 대응되는 n 의 총 수가 재조합될 기본영상 배열에서 k 번째 기본영상이 가질 수 있는 총 점의 수, 즉, 실제의 경우, 총 픽셀 수가 된다. 그리고 총 픽셀수는 n 이 가질 수 있는 값의 최대 수를 넘을 수 없으며, 이에 따라서 렌즈 배열1에서의 기본렌

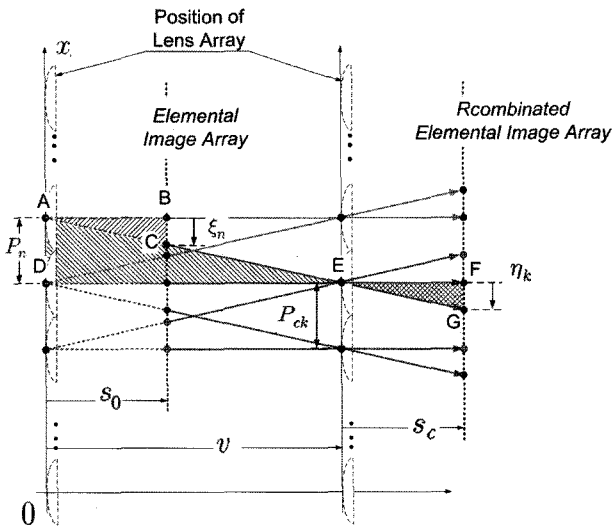


그림 2. 기본영상 재조합 조건(식 (4)와 (5))에 대한 기하학적 관계.

즈 또는 기본영상의 총 수를 넘을 수 없다. 또한 고정된 n 에 대해 여러 값의 k 가 대응될 수 있다. 대응되는 k 의 총 수는 재조합될 기본영상의 총 수가 되며, 다시 이 총 수는 식 (5)의 조건에 제한을 받는데, 실제의 경우와 같이 기본영상이 픽셀화 되었을 경우, 식 (1)이 만족하는 ξ_n 의 값은 불연속적인 값이 되어 대응 가능한 k 의 총 수, 즉, 재조합될 기본영상의 총 수가 렌즈배열에 의한 하나의 기본영상이 갖는 픽셀 수를 넘을 수 없게 된다. 그러나 기본영상의 픽셀수가 매우 많아 ξ_n 과 η_k 가 거의 연속적이고, 기본렌즈의 개수가 매우 많은, 즉, n 과 k 가 가질 수 있는 수가 매우 큰 경우, 큰 수의 관점에서 식 (4)와 (5)의 조건은 항상 성립하며, 이에 따라 v 의 선택은 자유롭다. 그리고 ξ_n 과 η_k 가 연속적이지 않고 n 과 k 가 적은 수를 가져 그 조건들이 성립될 수 없는 조건의 경우일지라도 근사적인 값들을 선택할 수 있고, 이에 따라 나타나는 재생영상의 부분적 왜곡을 인정하는 범위 안에서 임의의 v 를 선택하는 것이 가능하다. 따라서 적절한 v 의 선택에 의한 재조합조건을 통해 기본영상을 재조합함으로써 재생영상의 깊이를 임의로 변환할 수 있다. 또한 근사적 선택에 의한 부분적 왜곡을 제외하고 재생영상의 어떠한 왜곡도 없이 변환이 가능하다. 그림 2는 기본영상 재조합 조건 식(4)와 (5)에 대한 기하학적 관계를 나타낸 그림이다. 그림 상의 두꺼운 화살표의 선들은 두 기본영상 상의 상호 대응하는 점들을 나타내고 있으며, 좌측의 기본영상으로부터 우측의 기본영상으로 재조합하는 경우, 좌측 기본영상 상의 해당 점 또는 픽셀이 재배치되어야 할 위치 변화를 나타낸다. 식 (4)의 조건은 삼각형 A-D-E와 E-F-G 사이의 비례관계에 해당하며, 식 (5)는 삼각형 A-B-C와 E-F-G 사이의 비례관계에 해당한다.

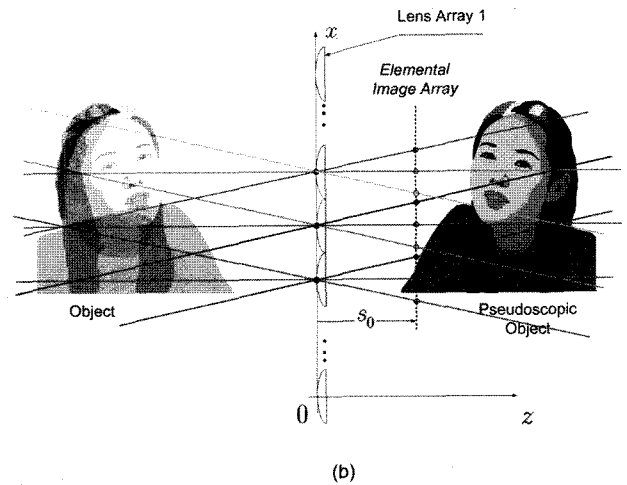
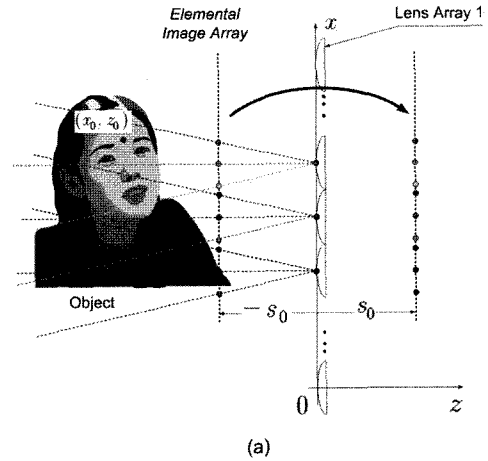


그림 3. s_0 의 부호 설정에 따른 기본영상 정보와 대응하는 물체 정보. (a) $s_0 < 0$ 일 경우의 기본영상 정보, (b) $s_0 < 0$ 일 경우의 기본영상정보에 의한 $s_0 > 0$ 일 경우의 물체정보.

III. 재생영상의 깊이 특성별 재조합 조건

깊이 변환에 있어 렌즈배열로부터의 단순 깊이 변환뿐만 아니라 도치영상 또는 정치영상으로의 변환과 실상 또는 허상으로의 변환까지 가능하다. 이러한 변환은 식 (4)와 (5)의 재조합 조건에서 s_0 와 s_c 의 부호 설정이나 v 의 적절한 선택을 통해 가능하다. s_0 의 부호변환은 기본영상 재조합 시 부호가 변환되지 않은 s_0 에 대해 그림 1에서의 물체가 렌즈배열을 기준으로 하여 대칭된 형태의 물체정보를 갖는 경우로 해당시키는 역할을 한다. 그림 3은 $s_0 < 0$ 인 경우의 기본영상의 정보와 이에 대응하는 물체 정보에 대한 그림이다. $s_0 < 0$ 인 경우, 식 (1)로부터 기본영상의 점들과 대응하는 대응관계들은 그림 3(a)와 같다. 실제 기본영상 획득 시 $s_0 < 0$ 이 되는 경우는 오목렌즈 배열을 통하여 기본영상을 획득하거나, 볼록렌즈 배열로 획득 한 후, 기본영상을 회전하는 방법 등이 있다. 이와 같이 영상을 획득 한 후, 식 (1)의 대응관

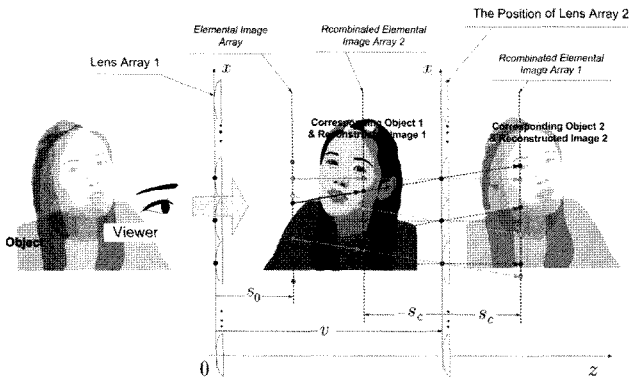


그림 4. $s_0 < 0$ 일 때, s_c 의 부호 설정에 따른 기본영상 재조합 및 재생영상.

계에서 $s_0 > 0$ 이 되면, 기본영상의 점들이 갖는 대응관계들은 그림 3(b)와 같이 렌즈배열을 기준으로 하여 대칭인, 즉, 렌즈 배열의 반대편에 위치한 도치물체에 대한 대응관계들과 같게 된다. 이는 간단히 볼록렌즈 배열을 통해 획득한 기본영상에 대해 식 (1)에서 s_0 를 음수로 설정하였을 경우의 대응관계와 같다. s_c 의 부호 변환은 s_0 의 부호를 변환을 통한 대응 물체정보의 대칭 이동이 렌즈배열2가 기준이 되어 이루어지게 하는 역할을 한다. 따라서 s_0 와 s_c 의 부호 조합에 따라 도치 또는 정치영상으로 재생영상의 깊이 변환이 가능하다.

그림 4는 s_0 를 음수로 설정하였을 경우, s_c 의 부호 설정에 따른 기본영상 재조합과 재생영상의 특성에 대한 그림이다. s_c 를 양수로 설정하였을 경우, 이에 따른 대응 물체정보는 그림 4에서 s_0 의 부호 설정에 따른 대응 물체정보와 같은 대응 물체 1과 같다. 그리고 재조합 조건에서 설정한 렌즈배열 2와 같은 특성과 위치를 갖는 렌즈배열을 통해 재생을 할 경우, 관찰자는 그림 4와 같은 방향에서 관찰하여야 하며, 재생 영상은 정치 실상의 특성을 갖게 된다. $s_c < 0$ 로 하였을 경우, 재조합될 기본영상에 대응하는 물체정보는 그림 4에서 대응 물체 2와 같이 s_0 의 부호 설정에 의한 대응 물체정보가 렌즈배열2를 기준으로 하여 대칭 이동된 형태를 갖는다. 그리고 $s_c > 0$ 로 설정했을 경우와 같이 재생하였을 경우, 재생 영상의 형태는 도치 허상의 형태를 갖는다. 따라서 대응물체 정보의 대칭이동의 기준을 결정하는 v 의 적절한 설정을 통해 렌즈배열로부터의 재생거리, 즉 재생영상의 깊이를 실상 및 허상뿐만 아니라 임의의 깊이로 변환할 수 있다. 그러나 s_0 와 s_c 의 부호 변환 또한 대응물체정보를 렌즈 배열에 대해 대칭적으로 이동시키므로 재생영상의 실상 및 허상으로의 변환을 동반하기 때문에 s_0 와 s_c 의 부호 조합이 같이 고려되어야 한다. 그림 4에서 $s_c > 0$ 인 경우, $|z_0|$ 가 $|v|$ 보다 작은 물체 또는 물체의 일부분은 실상으로 재생이 되며 $|z_0|$ 가 $|v|$ 보다 크게 되는 경우는 허상으로 재생되고 $s_c < 0$ 인 경우는 양수인 경우와 반대의 특성으로 재생이 이루어진다. 그리고 v 는

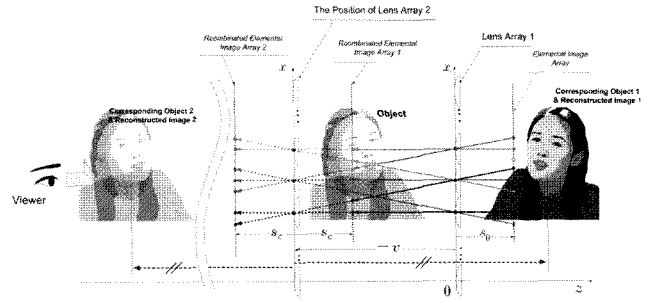


그림 5. $s_0 < 0, v < 0$ 일 때, 기본영상 재조합과 재생영상의 특성.

음의 값을 가질 수도 있는데, s_0 와 s_c 에 변화를 주지 않았을 경우, $|z_0|$ 가 $|v|$ 보다 작은 물체는 허상으로, 큰 물체는 실상으로 재생시킬 수 있다. 이전의 경우와 같이 $s_0 < 0$ 로 변환한 경우는 v 가 음의 값을 가짐에 의해 $|z_0|$ 와 $|v|$ 의 크기 비교와 상관없이 $s_c > 0$ 이면 허상, $s_c < 0$ 이면 실상의 형태로 재생이 이루어진다.

그림 5는 $s_0 < 0$ 로 변환한 후, 렌즈배열2의 위치 v 가 음의 값을 가질 경우에 기본영상 재조합과 재생영상의 특성에 관한 그림이다. 여기서 z_0 는 항상 음이 되도록 설정하였으므로 v 에 대한 부호 설정에 상관없이 $z_0 + v$ 의 부호에 따라 간단히 재생특성을 분류할 수 있다. $s_0 > 0$ 인 경우는 v 에 대해서는 $s_0 - v$ 의 부호를 통하여 간단히 분류될 수 있는데, 표 1은 $s_0 > 0$ 인 경우를 포함하여 각 변수 설정에 따른 재생영상의 깊이 순서 및 실·허상 특성에 대해 분류한 것이다. 따라서 표 1에 따른 재조합 조건상의 변수들의 적절한 선택을 통하여 재생영상의 깊이 순서와 실·허상 특성, 임의의 깊이로의 변환이 가능하다. 그리고 여기서 재생영상의 렌즈배열로부터의 거리인 재생 깊이는 대응물체정보와 v 와의 거리에 해당하므로 $s_0 < 0$ 인 경우는 $|z_0 + v|$ 의 크기를 갖고 $s_0 > 0$ 인 경우는 $|z_0 - v|$ 의 크기를 갖게 된다. 덧붙여 s_0, s_c, P_n, P_{ck} 등은 부호 이외의 임의의 값을 취하였을 경우, 재생영상에 왜곡이 나타나게 되는데, 특별한 변형이 필요한 경우, 각 변수들의 변환을 통하여 그에 따라 나타나는 왜곡을 변형의 형태로 활용하는 것 또한 가능하다.

IV. 기본영상 재조합과 영상재생 실험

그림 6은 기본영상 재조합을 통한 재생영상의 깊이 변환에 관한 실험 과정을 보여주고 있다. 물체는 기본영상 획득 장치로부터 200mm에 있는 하트모양의 평면물체와 300mm에 있는 창문모양의 평면물체를 사용하였다. 기본영상 배열의 획득은 렌즈배열 대신 카메라를 4mm씩 옮겨가며 총 40개의 영상을 획득하여 1차원적으로 배열함으로써 얻었다. 기본영상 재조합은 획득된 기본영상 배열에서 재조합조건 식 (4)와 (5)에 따라 각 기본영상으로부터 픽셀열(stripe)을 하나씩 선택하여 각 기본영상을 재구성하는 방식으로 영상처리를 통

표 1. s_0, s_c, v 의 부호 설정에 따른 재생영상의 깊이 순서 및 실, 허상 특성.

s_0	s_c	$z_0 + v$	깊이순서	실, 허상 특성
-	-	-	도치	실상
-	-	+	도치	허상
-	+	-	정치	허상
-	+	+	정치	실상
s_0	s_c	$z_0 - v$	깊이순서	실, 허상 특성
+	-	-	정치	허상
+	-	+	정치	실상
+	+	-	도치	실상
+	+	+	도치	허상

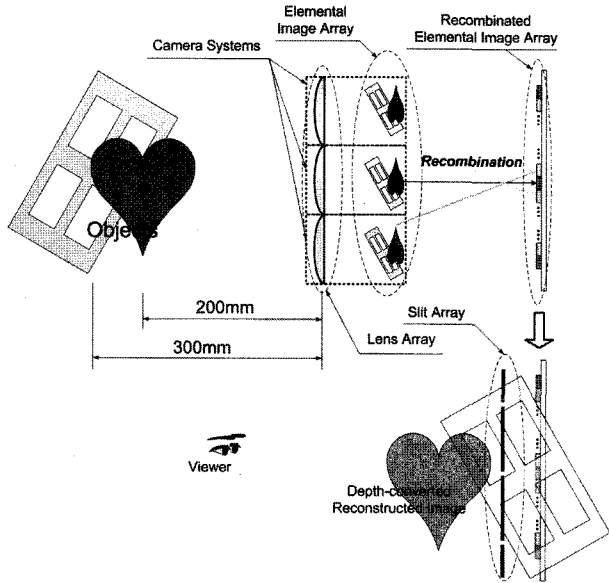
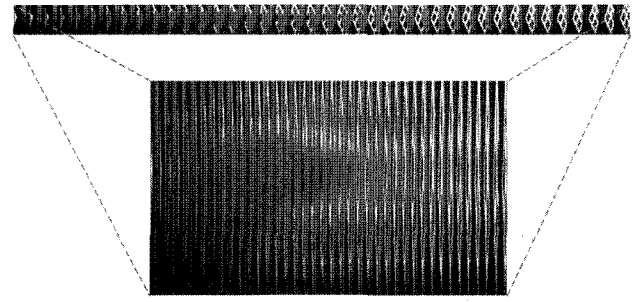


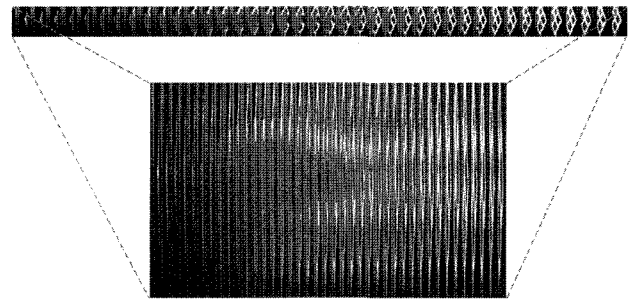
그림 6. 기본영상 재조합을 통한 재생영상의 깊이변환 실험 방법.

하여 이루어졌다. II절에서 논의된 바와 같이 픽셀열은 등간격으로 선택하였으며 슬릿 배열을 통하여 재생하였다. 슬릿 간의 간격은 4mm이며 틈은 약 200 μ m로 하였다. 재생영상의 관찰은 약 3m 정도의 거리에서 좌측 15도, 정면, 우측 15도의 각도에서 이루어졌다. 본 실험은 대표적으로 표 1에서 $s_0 < 0$ 인 경우에 한하여 s_c 의 부호와 $z_0 + v$ 의 부호 설정에 따른 기본영상들로 재조합하고 재생영상을 관찰하였다. 여기서 $z_0 + v < 0$ 인 경우의 v 는 카메라로부터 가까운 물체보다 더 가까운 130mm로 하였고, $z_0 + v > 0$ 인 경우는 카메라로부터 먼 물체거리보다 더 먼 540mm로 설정하였다.

그림 7은 재조합을 위한 기본영상 배열로써, 카메라 이동을 통해 획득한 영상 배열이다. 그림 7(a)는 카메라 이동을 통해 획득된 영상 배열과 슬릿 배열을 통한 재생을 위해 적절한 크기로 조절된 기본영상 배열이다. 영상 배열의 크기는 슬릿 배열의 크기에 맞추어 상하로 확대하였는데, 이는 슬릿 배열의 크기의 1차원적으로 배열된 렌즈배열, 즉, 렌티큘라를 통해 획득된 기본영상과 같다. 그림 7(b)는 $s_0 < 0$ 인 경우



(a)



(b)

그림 7. 기본영상 배열. (a) 기본영상 배열 및 슬릿 배열을 통한 재생을 위해 크기를 조절한 기본영상 배열, (b) $s_0 < 0$ 인 경우의 영상 배열 및 크기가 조절된 기본영상 배열(각 기본영상의 좌우가 반전된 영상 배열).

의 영상 배열 및 조절된 크기의 기본영상 배열이다. $s_0 < 0$ 인 경우의 기본영상 배열은 III절에서 논의된 바와 같이 통상적으로 각 기본영상을 180도 회전시킴으로써 얻을 수 있다. 그러나 본 실험에서는 기본영상 배열이 1차원적 배열이므로 각 기본영상을 좌우로 반전시킴으로써 얻었다.

그림 8은 획득된 기본영상 배열을 슬릿배열에 적합하게 조절하여 재생한 결과들이다. 그림 8의 각 열은 좌측, 정면, 우측에서 관찰한 재생영상들이다. 그림 8(a)는 그림 7(a)의 기본영상으로 재생한 결과인데, 좌우측 관찰 각도에 따른 재생영상의 상대적 위치로부터 알 수 있듯이 통상적인 집적결상법에서의 결과와 같은 도치 실상으로 재생되었다. 그림 8(b)는 $s_0 < 0$ 가 되도록 기본영상을 회전시킨 배열인 그림 7(b)를 사용하여 재생한 결과이다. 마찬가지로 좌,우측 관찰각도에 따른 재생영상의 상대적 위치를 통하여 이 경우의 통상적인 집적결상법의 결과인 정치 허상으로 재생되었다.

그림 9는 그림 7의 기본영상을 재조합한 결과로써, $s_0 < 0$ 인 경우의 재조합된 기본영상 배열이다. 재조합된 각 기본영상의 가로 픽셀 수는 40개이다. 관찰을 용의하게 하기 위해 재생을 위한 크기조절 이전의 영상, 즉, 기본영상 배열을 상하로 축소한 그림이다. 그림 9(a), (b), (c), (d)는 $s_c < 0$ 이고 $z_0 + v < 0$ 인 경우, 그리고 $s_c > 0$ 이고 $z_0 + v < 0$ 인 경우, $s_c > 0$ 이고 $z_0 + v > 0$ 인 경우, $s_c < 0$ 이고 $z_0 + v > 0$ 인 경우

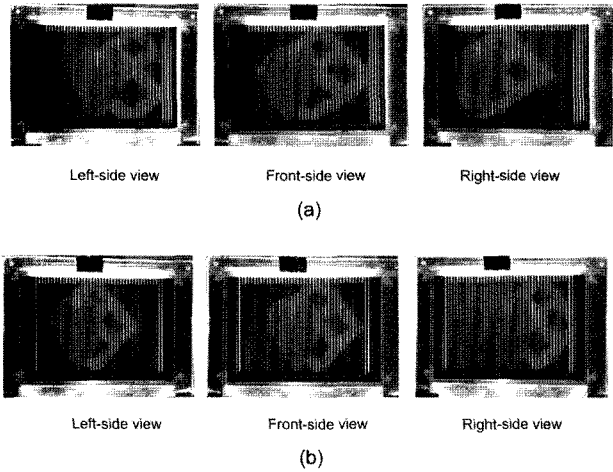


그림 8. 기본영상에 의한 재생영상. (a) 원본 기본영상 배열(그림 7(a)에 의한 재생영상, (b) $s_0 < 0$ 인 경우로 변환된 기본영상 배열(그림 7(b)에 의한 재생영상.

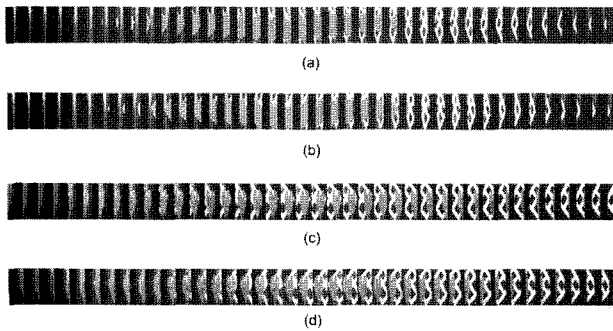


그림 9. $s_0 < 0$ 인 경우로 재조합된 기본영상 배열. (a) $s_c < 0$, $z_0 + v < 0$ 인 경우, (b) $s_c > 0$, $z_0 + v < 0$ 인 경우, (c) $s_c > 0$ 와 $z_0 + v > 0$ 인 경우, (d) $s_c < 0$, $z_0 + v > 0$ 인 경우의 재조합된 기본영상 배열.

에 대한 각각의 재조합된 기본영상 배열이다. 그림 9(a)와 (b), 그리고 그림 9(c)와 (d)의 각각의 비교를 통해 알 수 있듯이 s_c 의 부호 변환은 각 기본영상을 좌우 반전한 결과와 같다. 그림 9의 (a)와 (b)에서 각 기본영상의 하트에 대한 부분들이 (c)와 (d)의 경우 보다 배열 상에서 전체적으로 하트의 모양에 더 가까운 형태를 띠고 있음을 알 수 있다. 이는 이 기본영상에 대응하는 물체 정보의 절대적 깊이가 매우 작다는 것을 의미하는데, (a)와 (b)의 경우에 설정된 v 가 (c)와 (d)의 경우 보다 하트에 더 가깝기 때문이다.

그림 10은 재조합된 그림 9의 기본영상으로 각각 재생한 결과이다. 각 행은 그림 9의 기본영상 배열들을 재생에 적합하도록 상하로 크기를 조절한 기본영상과 재생영상을 좌측, 정면, 우측에서 각각 관찰한 결과들이다. 그림 10의 (a)행은 그림 9(a), (b)행은 그림 9(b), (c)행은 그림 9(c), (d)행은 그림 9(d)의 기본영상으로 각각 재생한 결과들이다. 그림 9로부터 표 1의 결과와 같이 재생영상의 특성이 결정되었음을 알 수 있다. 그림 10(a)의 경우, 표 1에서의 정리와 같이 s_0 와 s_c ,

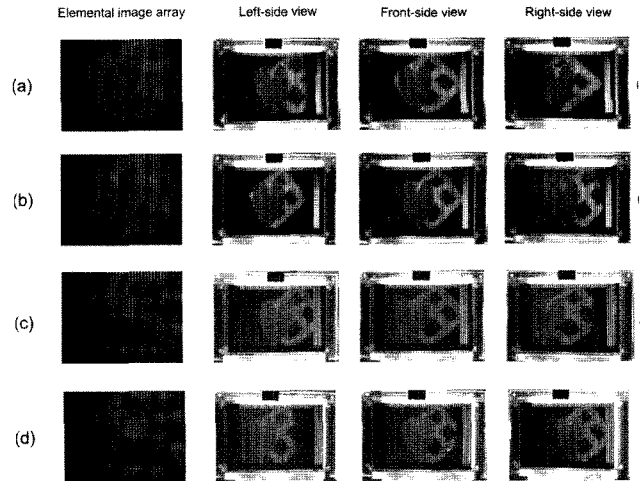


그림 10. 재조합된 그림 9의 기본영상에 의한 재생영상(각 행은 그림 9의 기본영상 배열들을 재생에 적합하도록 상하로 크기를 조절한 기본영상, 재생영상을 좌측, 정면, 우측에서 관찰한 결과의 순으로 배치되었다). (a), (b), (c), (d)행은 각각 그림 9(a), 9(b), 9(c), 9(d)를 기본영상으로 하여 각각 재생한 결과이다.

$z_0 + v$ 가 모두 음인 경우는 도치 실상으로 재생이 됨을 알 수 있다. 또한 조합되지 않은 기본영상에 의한 재생영상인 그림 8(a)와 비교할 때, 재생영상의 특성은 도치 실상으로 같지만, 관찰 각에 따른 슬릿배열에 대한 재생영상의 상대적 위치 변화가 더 작다. 그리고 재생영상에서 하트의 움직임이 특히 작은 것을 관찰할 수 있는데, 이는 III절에서 논의된 바와 같이 설정된 v 가 특히 하트에 대한 대응물체정보와 가까이 있기 때문이고, $|z_0 + v|$ 의 크기가 하트 물체의 경우가 특히 작기 때문이다. 그림 10(b)의 경우 또한 마찬가지로 표 1의 정리와 같이 $s_0 < 0$ 이고 $s_c > 0$, $z_0 + v < 0$ 인 경우는 정치 허상으로 재생되었음을 알 수 있다. 그리고 그림 10(a)의 경우와 마찬가지로 조합되지 않은 기본영상에 의한 재생영상이며 재생특성이 같은 그림 8(b)와 비교할 때, 재생 깊이가 작아진 것을 확인 할 수 있다. 그림 10(c)와 (d)의 경우, 표 1에서 정리된 바와 같이 $s_0 < 0$ 이고 $s_c > 0$ 와 $z_0 + v > 0$ 일 때 재생영상은 정치 실상의 특성을 갖고 $s_0 < 0$ 이고 $s_c < 0$ 이며 $z_0 + v > 0$ 일 때는 도치 허상의 특성을 가짐을 확인할 수 있다. 따라서 이와 같이 기본영상 재조합 조건하에서 적절한 변수들의 설정을 통하여 정치 및 도치, 실상 및 허상 그리고 임의의 깊이로 재생영상의 깊이를 변환할 수 있음을 확인할 수 있다. 그리고 모든 경우의 변환에 있어 재생영상의 크기는 변화가 거의 나타나지 않았고, 관찰각도에 따른 하트와 창문모양의 두 재생영상 사이의 상대적 이동에 대한 차이가 거의 없다. 이를 통해 재생영상의 크기와 깊이에 있어서 왜곡이 없음을 알 수 있다. 또한 본 실험의 결과로 볼 때, 재조합 관계식은 $s_0 > 0$ 인 경우나 $v < 0$ 인 경우에도 적용할 수 있다.

V. 결 론

3차원 영상 재생을 위한 집적결상법에서 기본영상의 재조합을 통한 재생영상의 깊이변환에 관하여 연구하였다. 렌즈 배열 또는 카메라 배열 등을 통하여 획득된 영상 배열을 적절한 조건 하에서 재조합하여 재생함으로써 재생영상의 깊이에 대해 도치 영상 또는 정치 영상, 허상, 실상 뿐만 아니라 임의의 깊이로의 왜곡 없는 변환이 가능한 재조합 조건을 이론적으로 도출하고 대표적인 몇 가지 실험들을 통하여 그 타당성을 확인하였다. 기본영상의 재조합 조건은 기본영상 획득시의 렌즈배열로부터 임의의 거리를 갖는 렌즈배열을 설정하고, 각 렌즈 배열을 통해 기본영상으로 획득될 대응관계들이 일치할 조건으로부터 얻을 수 있다. 정치 또는 도치에 대한 재생영상의 특성은 기본영상 재조합 조건에서 기본영상 획득시의 렌즈배열과 기본영상 사이의 거리 변수, 재조합을 위해 설정된 렌즈배열과 재조합될 기본영상 사이의 거리 변수의 부호 조합에 따라 결정된다. 실상 또는 허상 그리고 상의 깊이에 대한 재생영상의 특성은 기본영상 획득을 위한 렌즈 배열과 재조합을 위해 설정된 렌즈배열사이의 설정된 거리와 두 렌즈배열과 기본영상사이의 거리변수들의 부호 조합에 따라 결정된다. 이와 같은 방식에서의 재생영상의 깊이변환은 재생영상의 크기 및 깊이에 있어 왜곡을 동반하지 않고 비교적 단순한 영상처리를 통하여 이루어질 수 있다. 본 연구의 결과는 기본영상 변환을 이용한 집적결상법의 여러 응용들에 적용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] G. Lippmann, "La photographie integrale," *C. R Acad. Sci.* vol. 146, pp. 446-451, 1908.
- [2] 서장일, 차성도, 신승호, "집적결상된 3차원 영상의 중복 및 누락 왜곡에 대한 연구", 한국광학회지, 15권 3호, no. 3, pp. 234-240, 2004.
- [3] 서장일, 신승호, "집적결상법에서 기본영상의 크기 변환에 따른 3차원 재생영상의 특성 분석", 한국광학회지, 16권 3호, no. 3, pp. 225-234, 2005.
- [4] Jae-Hyeung Park, Sungyong Jung, Heejin Choi, and Byoung-Ho Lee, "Viewing-angle-enhanced integral imaging by elemental image resizing and elemental lens switching", *Appl. Opt.* vol. 41, no. 32, pp. 6875-6883, 2002.
- [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, Hak-Rin Kim, Yunhee Kim, JooHwan Kim, Jisoo Hong, Sin-Doo Lee, Byoung-Ho Lee, "Depth-enhanced three-dimensional-two-dimensional convertible display based on modified integral imaging", *Opt. Lett.* vol. 29, no.23, pp. 2734-2736, 2004.
- [7] N. Davies, M. McCormick, and M Brewin, "Design and analysis of an image transfer system using microlens array", *Opt. Eng.* vol 33, no. 11, pp. 3624-3633, 1994.
- [8] 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.
- [9] Ju-Seog Jang and Bahram Javidi, "Three-dimensional projection integral imaging using micro-convex-mirror arrays", *Opt. Exp.* vol. 12, no. 6, pp. 1077-1083, 2004.
- [10] Jang-Il Ser, Sungdo Cha, Seung-Ho Shin, and Bahram Javidi, "Orthoscopic integral imaging 3D display by use of negative lens array", in proceedings of CLEO/Pacific Rim 2003, taipei, vol 2, pp. 614, 2003.
- [11] Herbert E. Ives, "Optical properties of a lippmann lenticulated sheet", *J. Opt. Soc. Am.* vol 21, pp. 171-176, 1931.
- [12] B. Javidi and F. Okano, *Three-Dimensional Television, Video, and Display Technologies*, Springer, New York, pp.116-117, 2002.
- [13] Ju-Seog Jang and Bahram Javidi, "Depth and lateral size control of three-dimensional images in projection integral imaging", *Opt. Exp.* vol. 12, no. 16, pp. 3778-3790, 2004.
- [14] J.-H. Park, H. Choi, Y.Kim, J. Kim and B. Lee, "Scaling of three-dimensional Integral Imaging," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 44, no. 1A, pp. 216-224, 2005.

Depth-Conversion in Integral Imaging Three-Dimensional Display by Means of Elemental Image Recombination

Jang-Il Ser and Seung-Ho Shin[†]

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

[†]*E-mail: shinsh@kangwon.ac.kr*

(Received December 20, 2006, Revised manuscript January 24, 2007)

We have studied depth conversion of a reconstructed image by means of recombination of the elemental images in the integral imaging system for 3D display. With the recombination, depth conversion to the pseudoscopic, the orthoscopic, the real or the virtual as well as to arbitrary depth without any distortion is possible under proper conditions. The conditions on the recombinations for the depth conversion are theoretically derived. The reconstructed images using the converted elemental images are presented.