

---

# 평면기반 컴퓨터 집적 영상 복원 기술의 신호 모델을 이용한 3D 복원 영상 분석

신동학\* · 유훈\*\*

Analysis of 3D reconstructed images based on signal model of plane-based computational  
integral imaging reconstruction technique

Dong-Hak Shin\* · Hoon Yoo\*\*

## 요 약

평면기반 컴퓨터 집적 영상 복원 (CIIR) 기술은 3D 물체에 대한 깊이 영상 복원이 가능한 기술이다. 그러나 복원 되는 깊이에 따라 영상에 잡음이 발생하게 되어 해상도를 저하시키는 문제점이 있다. 본 논문에서는 이 문제점을 극복하기 위해서 CIIR 기술에 대한 신호 모델을 설명하고, 이를 통하여 CIIR 기술에 발생하는 잡음과 이를 보정하는 방법을 소개한다. 컴퓨터적 실험을 통하여 2D Gaussian 영상의 복원 영상에 대한 잡음 특성을 조사하고, 보정 과정을 통하여 고해상도의 영상을 얻을 수 있음을 보였다.

## ABSTRACT

Plane-based computational integral imaging (CIIR) provides the reconstruction of depth-dependent 3D plane images. However, it has problem degrading the resolution of reconstructed images due to the artifact noise according to the depth. In this paper, to overcome this problem, a signal model for plane-based CIIR is explain. Also the compensation process is introduced to remove the noise caused from CIIR. Computational experiments show that we analyze the characteristics of noise in the reconstructed image of 2D Gaussian image and the high-resolution images can be obtained by using the compensation process.

## 키워드

3D display, Integral imaging, Elemental images, Computational reconstruction

## I. 서 론

지금까지 3D 물체를 디스플레이하기 위한 다양한 방법이 연구되어 왔다. 이 중에서 집적 영상 (integral imaging) 방식은 백색광을 이용하여 3D 물체를 기록하고 재생할 수 있는 기술로서 1908년에 Lippmann에 의해서 처음 제안된 이후 많은 연구가 수행되어 왔다 [1]. 집

적 영상 기술은 기존의 잘 알려진 스테레오스코피 방식과는 달리 관찰자의 시각적 피로감이 없고 연속적인 시점과 수평, 수직시차를 모두 제공할 수 있다 [2,3].

집적 영상 기술은 일반적으로 그림 1과 같이 픽업 과정과 디스플레이 과정으로 나누어 진다. 집적 영상의 픽업 과정에서는 3D 물체 정보를 렌즈 배열과 영상검출기를 이용하여 2차원 요소 영상으로 기록한다. 그리고 디

---

\* 동서대학교 영상콘텐츠학과

\*\* 상명대학교 디지털미디어학부 (교신저자)

스플레이 과정에서 픽업과정에서 얻어진 2차원 요소 영상을 디스플레이 장치에 표현한 후 이들을 다시 렌즈 배열을 통과시켜 3D 영상으로 재생한다. 그림 1(a)에서 픽업되는 2차원 요소 영상은 3D 물체에 대해서 각각의 작은 렌즈를 통해서 얻은 작은 영상들의 조합이다. 따라서 요소 영상의 수는 렌즈 배열의 개수와 같다.

최근 이 집적 영상 기술을 이용하여 3D 물체의 깊이 정보 추출 및 물체 인식 등의 여러 가지 응용 분야에 적용하기 위하여 컴퓨터를 이용한 집적 영상 재생 방법이 활발하게 연구되고 있다 [4-8]. 이를 컴퓨터 집적 영상 재생 (computational integral imaging reconstruction: CIIR) 방법이라 부르며, 이 방법은 렌즈 배열의 각 요소 렌즈의 기하 광학적 원리를 컴퓨터를 이용하여 모델링함으로써 3D 정보를 컴퓨터적으로 재생하는 방법이다.

컴퓨터 집적 영상 재생 방법은 다시 시점 기반 (view-based) CIIR 방법과 평면기반 (plane-based) CIIR 방법으로 분류한다. 시점 기반 CIIR 방법은 광학적 픽업으로 획득한 요소영상들에서 대응 시점으로부터 한 픽셀씩을 추출하여 집합하면 특정 시점에서 관측한 영상이 재생되는 방법이다 [4]. 이에 반해 평면기반 CIIR 방법은 3D 영상을 일정한 거리에 놓인 평면에서 재생하는 방법으로 재생되는 3D 영상은 영상 재생의 평면의 위치에 따라 달라진다 [5]. 그러나 기존의 평면기반 CIIR 방법에서는 각 요소렌즈를 가상의 핀홀로 모델링한 핀홀 배열 모델을 사용하였기 때문에 재생 영상에서 격자 구조의 밝기 불균일 현상 및 해상도를 떨어뜨리는 현상이 발생하는 문제점이 보고되었다 [9].

본 논문에서는 이러한 해상도 저하 문제점을 극복하기 위해서 평면기반의 CIIR 방식의 신호 해석 모델을 자세히 설명하고 이 모델을 사용하여 실제 2D 복원 영상에서 어떠한 영향이 발생하는지를 보고하고자 한다. 이를 위한 기초적인 실험을 수행하고 그 결과를 보고한다.

## II. 평면기반 CIIR 방법

그림 1에서와 같이 렌즈 배열을 이용하는 경우에는 광학적으로 3D 영상이 얻어진다. 이에 반해서 디스플레이 과정을 컴퓨터적으로 계산하여 3D 영상을 재생할 수 있다. 이 방법이 평면기반 CIIR 방법이다.

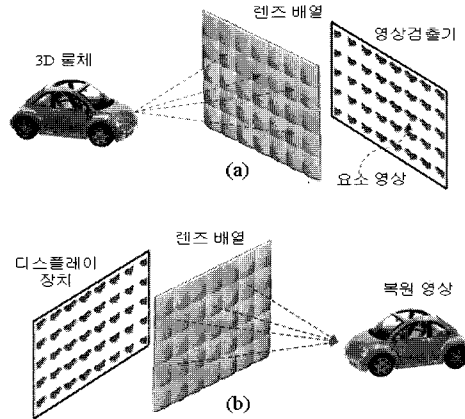


그림 1. 집적 영상 기술 (a) 픽업 (b) 디스플레이  
Fig. 1. Integral imaging technique (a) pickup (b) display

그림 2는 거리  $z = L$ 에서 핀홀 배열 모델을 이용하여 디스플레이 평면에 영상을 재생하기 위한 평면기반 CIIR 방법의 원리를 나타낸다. 핀홀 배열로부터 고정된 거리  $z=L$ 에서 각 요소영상은 대응되는 가상의 핀홀 배열을 통해서 역으로 투영된다. 투영된 영상은 확대 배율  $M$  만큼 확대된다. 이때  $M$  은 핀홀 배열과 재생 이미지 평면 ( $L$ ) 사이의 거리와, 핀홀 배열과 요소영상 평면( $g$ ) 사이의 거리의 비율, 즉  $M = L/g$ 로 결정된다.  $M > 1$  일 때, 투영된 이미지들은 재생 이미지 평면  $z$ 에서 확대된 인접한 요소 영상들과 서로 중첩된다. 3D의 입체감 있는 정보를 재생하기 위해서는, 재생하고자 하는 모든 영상 평면들에 대응하는 거리에서 위와 동일한 과정을 반복한다.

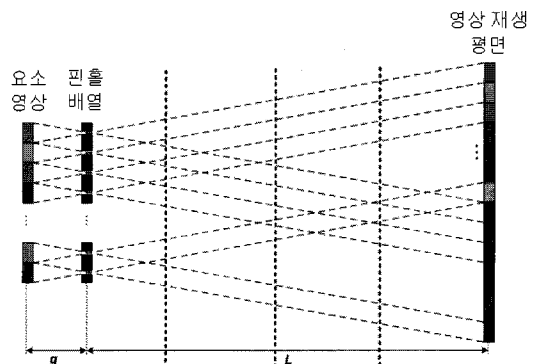


그림 2. 평면기반 CIIR 방법의 원리  
Fig. 2. Principle of plane-based CIIR

### III. 평면기반 CIIR의 해석을 위한 신호 모델

#### 3.1 신호 해석 모델

평면기반 CIIR로부터 복원되는 영상의 신호 해석을 위해서는 먼저 전체 컴퓨터 집적 영상 시스템을 분석하여야 한다. 이를 위해서 그림 3의 1차원적인 신호 모델을 고려하자. 이 모델은 픽업과정과 디스플레이 과정의 대칭적인 구조를 가진다. 그림 3에서 먼저 픽업과정을 고려하자. 이때 렌즈 배열로부터 z 거리에 위치한 물체 평면의 세기 신호를  $f_z(x)$ 라고 하자. 그러면  $f_z(x)$  신호는 렌즈 배열을 통해서 특정한 윈도우형태로 요소 영상으로 매핑이 이루어진다.

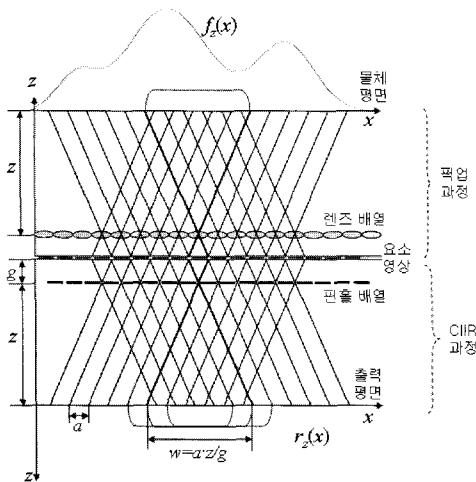


그림 3. 컴퓨터 집적 영상 시스템 분석을 위한 신호 모델  
Fig. 3. Signal model for the analysis of the computational integral imaging system.

다음으로 평면 기반의 CIIR 과정의 신호 모델을 고려하자. 여기서는 핀홀 배열로부터 z 거리에 위치한 출력 평면에서의  $r_z(x)$ 신호는 만들기 위해서는 요소 영상이  $M=z/g$  계수만큼 확대되고 역으로 매핑이 되어야 한다. 이들 확대된 요소 영상들은 출력 평면에서 서로서로 중첩하게 되고 최종적으로 3D 평면 영상이 얻어진다.

그림 3의 기초적인 신호 모델을 이용하여 원 신호  $f_z(x)$ 와 복원신호  $r_z(x)$  사이의 관계를 알 수 있다. 즉,  $r_z(x)$ 는  $f_z(x)$ 의 윈도우형태의 버전들의 선형 합으로 고려할 수 있다. 여기서 픽업과정에서  $f_z(x)$  신호의 윈도우 과정, 역

전(inverting) 과정, 그리고 다운스케일(down-scaling) 과정으로 구성되어 있음을 알 수 있다. 이에 반해 CIIR 과정에서는 요소영상에 대해서 확대 과정과 업스케일(up-scaling) 과정을 가진다. 따라서 역전 과정과 스케일링 과정은 서로 상쇄되고 윈도우과정만이 남게 된다. 따라서 그림 4의 구조로부터 CIIR로부터의 복원 신호  $r_z(x)$ 는 원 신호  $f_z(x)$ 의 윈도우 버전의 합임을 알 수 있다. 이를 수식으로 표현하면

$$\begin{aligned} r_z(x) &= \sum_{i=0}^{N-1} f_z(x) \pi_i\left(\frac{x}{w}\right) \\ &= f_z(x) \sum_{i=0}^{N-1} \pi_i\left(\frac{x}{w}\right) \\ &= f_z(x) S_\pi(x) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $\pi_i(x/w) = \pi_0((x-s)/w)$ 이고, N은 요소영상의 개수이며, w는 윈도우의 크기이다. 여기서  $\pi(x)$ 를 이동 윈도우 함수(shift window function: SWF)로 정의하며 이것은 사각 윈도우 함수  $\pi_0(x)$ 의 이동된 버전으로써, [0, 1]의 범위에서는 1의 값을 가지고 나머지는 0이다. 그리고 이동함수 s는 요소 영상의 길이의 함수이다. 즉  $s=ia$ 이다.

식 (1)로부터 출력 신호  $r_z(x)$ 는 원 신호  $f_z(x)$ 와 SWF의 합  $S_\pi(x)$ 의 곱으로 나타남을 알 수 있다. 따라서 이  $S_\pi(x)$ 를 컴퓨터 집적 영상 시스템의 반응 함수로 정의할 수 있고,  $S_\pi(x)$ 의 특성을 분석함으로써 컴퓨터 집적 영상 시스템을 정확히 해석할 수 있다.

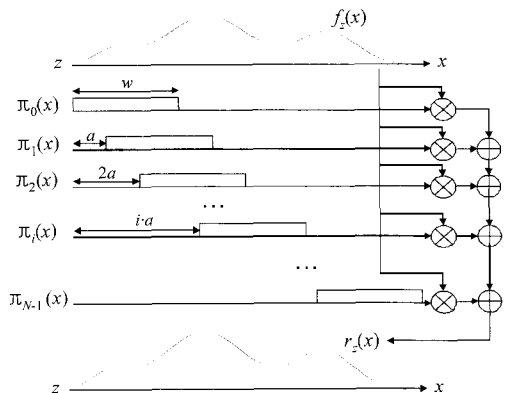


그림 4. 원신호와 복원신호 사이의 관계 설명  
Fig. 4. Illustration of relationship between original signal and reconstructed signal

복원 신호의 정확한 해석을 위하여 그림 5는 9개의 SWF의 중첩에 대한 예를 보여준다. 각각의 이동 윈도우의 크기가  $w$ 이고 이동 팩터  $s=ia$ 이므로  $S_{\pi}(x)$ 의 중첩 결과는 두 개의 영역으로 나눌 수 있다. 첫 번째는 천이 (transition) 영역이고 다른 하나는 비천이(non-transition) 영역이다.  $S_{\pi}(x)$ 의 경계 영역에서는 중첩되는 윈도우의 수가 부족하여 천이 상태가 나타난다. 만약 중첩되는 요소 영상의 수가 충분히 크고, 복원 신호가 크다면 이 부분은 매우 영향이 복원 신호에 대한 영향이 거의 미흡하기 때문에 고려하지 않는다.

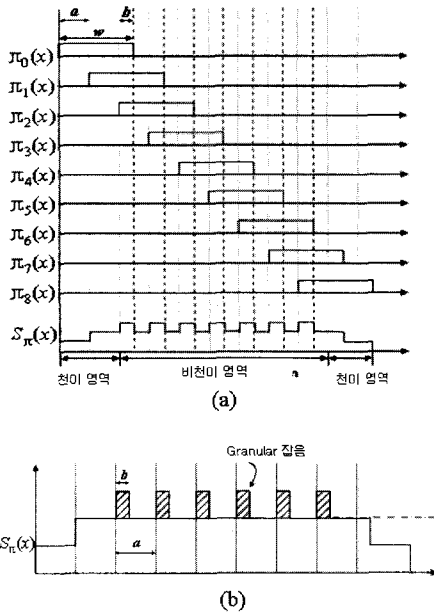


그림 5. (a) 9개의 SWF의 중첩의 예  
(b) Granular 잡음의 설명

Fig. 5. (a) Example of the sum of nine SWFs.  
(b) Illustration of granular noise.

### 3.2 Granular 잡음의 정의와 보정 과정

비천이 영역의 반응 함수  $S_{\pi}(x)$ 는 그림 5와 같이 균일한 세기 값을 가지지 않을 수 있다. 이 세기의 불균일함은 중첩에 참여하는 SWF의 수가  $x$ 축에 따라서 다르기 때문이다. 이 중첩되는 수는 정수 값이다. 여기서 우리는 그림 5(b)에서 보여지는 granular 성분을 정의할 수 있다. 이 값은 복원 신호에서 원치 않는 신호이기 때문에 granular 잡음이다. 이 granular 잡음을 올바르게 해석하기 위해서 그림 5(a)를 살펴본다. 여기서  $w$ 는  $a$ 의 값으로

나누어지면서 나머지가  $b$ 가 된다. 이의 관계를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$w = na + b = a \left( n + \frac{b}{a} \right) \quad (2)$$

여기서  $n$ 은 정수 값이고,  $b$ 는 0과  $a$  사이의 실수 값이다. 식 (2)에서 우리는 쉽게  $b$ 가 granular 잡음과 관련이 되어 있음을 확인할 수 있다. 따라서  $b$ 가 0이 되는 조건이 granular 잡음이 존재하지 않은 조건이다. 이를 GN-free 조건이라고 한다. 그리고 그림 3으로 부터

$$w = aM = a \frac{z}{g} \quad (3)$$

이기 때문에 식(2)와 (3)을 이용하여  $b=0$ 이 되는 조건은 다음과 같다.

$$b = a \left( \frac{z}{g} - n \right) = 0 \quad (4)$$

즉  $M=z/g$ 가 정수일 때에  $b=0$ 이 된다. 사실 GN-free 조건은 보정 과정을 추가하지 않아 하고도 정확하게 신호를 복원하는 조건이다. 따라서 GN-free 조건만을 사용하면 더 고속의 신호 복원이 가능하게 되어진다.

한편  $z/g$ 가 정수가 아닌 경우에는 granular 잡음이 항상 존재하게 된다. 이 경우에는 보정과정이 추가적으로 요구된다. 이를 간단하게 식 (1)에서 얻어진다.

$$f_z(x) = \frac{r_z(x)}{S_{\pi}(x)} \quad (5)$$

이 보정과정으로 복원 신호의 정확도는 높일 수 있다 할지라도 추가적인 과정이기 때문에 CIIR의 계산량을 증가시킬 수 있는 문제가 있다. 따라서 실시간 처리와 같은 고속의 연산을 수행할 경우에는 보정과정의 사용은 적절하지 않다.

## IV. 실험 결과

제안하는 평면기반 CIIR 방법의 신호모델을 이용하여 3D 영상의 특성을 자세히 조사하기 위해서 컴퓨터 픽

업 실험 및 재생 실험을 수행하였다. 실험을 위한 구조는 그림 6과 같으며, matlab 프로그램을 이용하여 구현하였다. 컴퓨터 픽업의 경우에는 렌즈 배열대신에 핀홀 배열을 이용할 수 있다. 픽업 과정에서 원 영상은 Gaussian 영상  $f(x,y)$ 로 사용한다. 이 영상은 핀홀 배열로부터  $z$ 만큼 떨어져 있고, 총  $N \times N$  개의 화소로 구성되어 있다. 이 Gaussian 영상은 다음과 같이 표현된다.

$$f(x,y) = e^{-(x^2+y^2)/2} \quad (6)$$

그리고 실험에 사용하는 핀홀 배열은  $30 \times 30$  개의 핀홀로 구성되어 있고 핀홀간의 간격은 1.08 mm이다. 그리고 핀홀 배열과 요소영상간의 거리는 3 mm이다. 하나의 핀홀을 통해서 얻어지는 요소 영상의 크기는  $30 \times 30$  픽셀이 되도록 하였고, 전체 요소 영상의 크기는  $900 \times 900$  이 된다. 이때 요소 영상의 제작을 위해서 참고논문 [10]의 ABCD 행렬 방식을 이용한다.

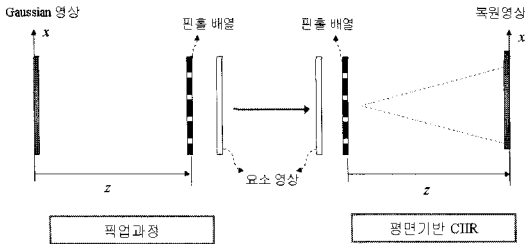


그림 6. Gaussian 영상을 이용한 실험 구성도  
Fig. 6. Experimental structure using Gaussian image

요소 영상의 픽업이 끝나고 나면 다음의 과정으로 CIIR 과정을 컴퓨터적으로 수행하였다. 여기서 핀홀 배열은 요소 영상으로부터 3 mm에 위치시켰고 CIIR의 원리에 의하여  $z$ 의 거리에 위치한 출력 평면으로 복원 영상을 얻었다. 복원된 영상의 해상도를 분석하기 위해서 본 논문에서는 평균 제곱 오차 (mean square error: MSE)를 사용한다. 이는 다음과 같다.

$$MSE = \frac{1}{N^2} \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N |f(x,y) - r(x,y)| \quad (7)$$

거리  $z$ 에 따른 복원되는 Gaussian 영상의 해상도는 조사하였다. 계산된 결과를 그림 7에 나타내었다. 여기에는 보정과정을 한 경우와 보정과정을 사용하지 않을 경우로

구분되어 있다. 보정과정을 사용하지 않은 경우에는 GN-free 조건일 경우 즉  $z/g$ 가 정수가 되는 경우에는 MSE가 매우 낮은 값이 나타나며, 정수가 아닌 경우에는 Granular 잡음 때문에 높은 값의 MSE가 나타남을 알 수 있다. 이에 반해 보정과정을 수행하게 되면  $z/g$ 의 값에 관계없이 모든 거리에서 낮은 MSE의 값을 보임을 알 수 있다.

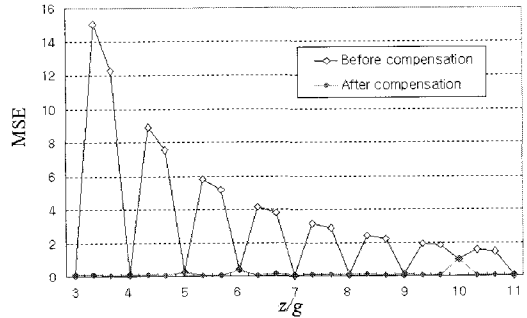


그림 7. Gaussian 영상에 대한 MSE 실험 결과  
Fig. 7. MSE results for Gaussian image

그림 8은 그림 7의 각 경우에 대한 복원 영상의 예를 보여준다. 이들 복원 영상에서 보여지듯이 granular 잡음이 존재하는 경우에는 영상을 심하게 왜곡시킴을 알 수 있으며, 보정과정을 통해서 완전한 영상으로 복원됨을 알 수 있다. 따라서 고속의 영상 응용분야가 아닌 경우에는 보정과정을 통하여 영상을 복원하는 것이 보다 높은 해상도의 영상을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

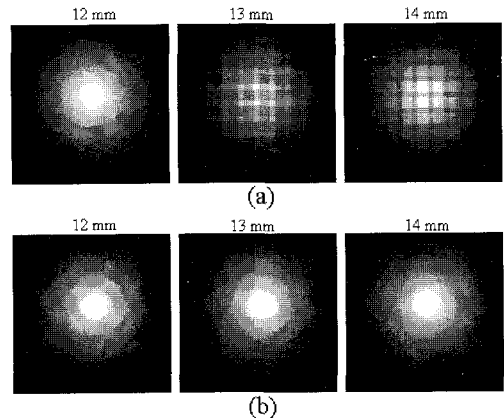


그림 8. 복원영상들 (a) 보상과정전 (b) 보상과정후  
Fig. 8. Reconstructed images (a) before compensation (b) after compensation

## V. 결론

결론적으로 본 논문에서는 평면기반 컴퓨터 집적 영상 복원 (CIIR) 기술에서 복원되는 깊이에 따라 영상에 잡음이 발생하게 되어 해상도를 저하시키는 문제점을 극복하기 위한 CIIR 기술의 신호 모델을 설명하고, 이를 통하여 CIIR 기술에 발생하는 잡음과 이를 보정하는 방법을 소개하였다. 그리고 컴퓨터적 실험을 통하여 2D Gaussian 영상에 대해서 거리에 따라 복원 영상의 특성을 비교하였고 granular 잡음이 존재하는 곳과 존재하지 않는 곳이 있음을 알 수 있었으며, 이 잡음을 제거하기 위해서 보정 과정을 사용하여 모든 거리에서 해상도가 높은 영상을 얻을 수 있음을 실험으로 확인하였다. 본 논문에서의 신호 해석 모델을 이용하여 CIIR에서 보다 해상도 높은 영상을 얻을 수 있으며, 이를 이용하여 3D 깊이 추출이나 3D 영상 인식 분야에 적용되어질 수 있을 것으로 기대한다.

## 참고문헌

- [1] G. Lippmann, "La photographic integrale," C.R. Acad. Sci. Vol. 146, pp. 446-451, 1908.
- [2] 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, pp. 1481-1482, 2001.
- [3] J. Jang and B. Javidi, "Improved viewing resolution of three-dimensional integral imaging by use of nonstationary micro-optics" Opt. Lett. Vol. 27, pp. 324-326, 2002.
- [4] H. Arimoto and B. Javidi, "Integral three-dimensional imaging with digital reconstruction" Opt. Lett. Vol. 26, pp. 157-159, 2001.
- [5] S.-H. Hong, J.-S. Jang, and B. Javidi, "Three-dimensional volumetric object reconstruction using computational integral imaging" Opt. Express, Vol. 12, pp. 483-491, 2004.
- [6] 신동학, 김남우, 이준재, 김은수 "원형 매핑 모델에 기초한 3차원 영상의 평면기반 컴퓨터 집적 영상 재생 방식", 한국해양정보통신학회 논문지, 제11권5

호, pp. 991-996, 2007.

- [7] S.-H. Hong and B. Javidi, "Distortion-tolerant 3D recognition of occluded objects using computational integral imaging," Opt. Express Vol. 14, pp. 12085-12095, 2006.
- [8] J.-S. Park, D.-C. Hwang, D.-H. Shin and E.-S. Kim, "Resolution-enhanced 3D image correlator using computationally reconstructed integral images," Opt. Commun. Vol. 276, pp. 72-79, 2007.
- [9] H. Yoo and D.-H. Shin, "Improved analysis on the signal property of computational integral imaging system," Opt. Express Vol. 15, pp. 14107-14114, 2007.
- [10] D.-H. Shin, B. Lee and E.-S. Kim, "Multidirectional curved integral imaging with large depth by additional use of a large-aperture lens," Appl. Opt. Vol. 45, pp. 7375-7381, 2006.

## 저자 소개

제12권 12호 참조