
화소대 화소 매핑 기반 컴퓨터 집적 영상에서의 그레놀라 잡음 해석

유 훈*

Granular noise analysis in pixel-to-pixel mapping-based computational integral imaging

Hoon Yoo*

요 약

본 논문은 화소대 화소 매핑 기반 컴퓨터 집적 영상에서 발생하는 그레놀라 잡음에 대한 해석을 제시한다. 화소 매핑 기반 집적 영상 복원 방식은 고해상도의 영상을 제공할 뿐 아니라 이전의 역투사 방식보다 연산량이 작다. 본 논문에서는 화소 매핑 방식에 대한 신호 모델이 소개되고, 이를 통하여 그레놀라 잡음을 정의하고 해석한다. 제시된 신호 모델을 기반으로 잡음에 대한 특성을 분석한 컴퓨터 실험이 제공된다. 실험 결과는 기존의 역투사 방식의 그레놀라 잡음 발생 형태와 상이함을 보여주며 이는 또한 화소 매핑 방식에서 활용될 수 있음을 보여준다.

ABSTRACT

This paper describes an analysis on the granular noise in pixel-to-pixel mapping-based computational integral imaging. The pixel mapping-based method provides a high-resolution reconstructed images and also its computational cost is very lower than the previous back-projection-based method. In this paper, a signal model for the pixel mapping-based method is introduced, which defines and analyzes the granular noise. Computer experiments provides the granular noise properties based on the proposed signal model. The experimental results indicates that the granular noise pattern differs from that of the back-projection based method. The results is also utilized in the pixel mapping-based method.

키워드

3차원 디스플레이, 집적영상, 컴퓨터 복원

Key word

3D display, Integral imaging, Computational reconstruction

* 정회원 : 상명대학교 (교신저자, hunie@smu.ac.kr)

접수일자 : 2011. 03. 07

심사완료일자 : 2011. 03. 30

I. 서 론

현재 3D 물체를 이미징하고 디스플레이하기 위한 다양한 방법들이 연구되고 있다. 이들 방법 중에서 집적 영상 (integral imaging) 방식은 백색광을 이용하여 3D 물체를 기록하고 재생할 수 있는 기술로서 1908년에 Lippmann에 의해서 처음 제안되었다 [1]. 이 기술은 기존의 잘 알려진 스테레오스코피 방식과는 달리 영상을 공중에 이미징하기 때문에 관찰자의 시각적 피로감이 없으며, 다양한 관측 시점을 제공하는 장점 때문에 최근에 많은 연구가 진행되고 있다 [2-5].

컴퓨터 집적 영상 기술은 일반적으로 그림 1과 같이 픽업 과정과 컴퓨터 재생 과정으로 나누어진다. 집적 영상의 픽업 과정에서는 3D 물체 정보를 렌즈 배열과 영상검출기를 이용하여 2차원 요소 영상으로 기록한다. 그림 1(a)에서처럼, 픽업되는 2차원 요소 영상은 3D 물체에 대해서 각각의 작은 렌즈를 통해서 얻은 작은 영상들의 조합이다. 따라서 요소 영상의 수는 렌즈 배열의 개수와 같다. 그리고 컴퓨터 재생 과정에서는 픽업 과정에서 얻어진 2차원 요소 영상을 핀홀 모델에 입각하여 컴퓨터를 이용하여 3D 영상으로 재생한다. 이를 컴퓨터 집적 영상 재생 (computational integral imaging reconstruction: CIIR) 방법이라 부른다. 컴퓨터 집적 영상 재생 방법은 역투사(back-projection) 방식[4-5]과 화소 매핑 방식[6]으로 나눌 수 있다. 역투사 방식은 픽업된 요소 영상을 핀홀을 통과하면서 거리별로 확대되는 영상을 복원 평면에 투사하는 방식이다. 반면에 화소 매핑 방식은 요소 영상의 각 화소가 핀홀을 거쳐서 도달하는 위치를 레이 추적을 활용하여 찾고 복원 평면에 매핑하는 방식이다.

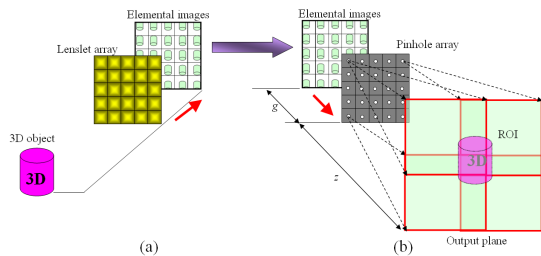


그림 1. 집적 영상 기술 (a) 픽업 (b) 컴퓨터 재생
Fig. 1. Integral imaging (a) pickup (b) computational reconstruction

저자는 최근 렌즈릿 배열을 사용하는 집적 영상 기술에 신호 해석 모델을 제안한 바 있다 [7-9]. 기 제안된 신호 해석은 집적 영상 기술에서 발생하는 그레놀라를 소개하고 특성을 분석하였다. 이런 분석은 집적 영상 시스템을 이해하는데 많은 도움을 주고 3D 영상 복원에 유용하게 사용되어 중요하다. 화소 매핑 방식은 역투사 방식과 달리 요소 영상을 확대와 중첩 과정이 필요 없다. 따라서 역투사 방식에서 중첩에 의한 흐림현상이 적어 상당히 개선된 화질을 컴퓨터 실험에서는 보여준다. 뿐만 아니라 요소 영상의 확대과정이 필요 없으므로 상당한 연산량을 절감할 수 있다. 특히 컴퓨터 재생의 경우 연산량의 증대는 시스템 가격을 높이는 문제임으로 중요하게 다루어져야 한다. 한편, 화소 매핑 방식에 대한 기술[6]이 소개되었지만 이에 대한 신호 해석과 그레놀라 잡음의 특성이 아직 보도 되지 않았다. 따라서 본 논문에서는 화소 매핑 방식의 컴퓨터 복원에서의 그레놀라 잡음에 대한 분석을 수행하고 그 특성을 보고한다.

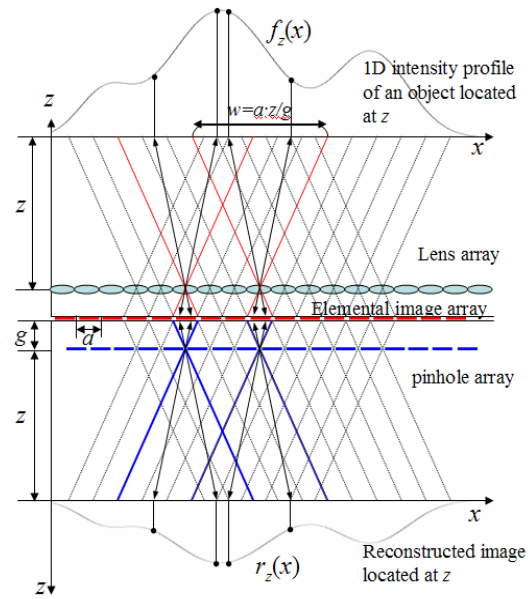


그림 2. 화소 대 화소 매핑 시스템 분석을 위한 신호 모델

Fig. 2. Signal model for the analysis of pixel-to-pixel mapping based system

II. 화소 대 화소 매핑 기반 시스템을 위한 신호 모델

화소 대 화소 매핑 기반 시스템에 대한 해석을 위해서 기존에 제안했던 집적 영상 신호 해석 기법을 활용한다. 기존의 집적 영상에 대한 신호 해석 방법은 이전의 논문에서 자세히 분석되었다 [7]. 그림 2는 기존 신호 모델에서 요소 영상의 화소들이 채워치되는 과정을 보여준다. 그림 2에서 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 사각 윈도우 형태로 요소 영상으로 매핑이 이루어진다. 다음으로 CIIR 재생 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. 이 과정을 간략한 이동 윈도우로 재구성하면 그림 3과 같다.

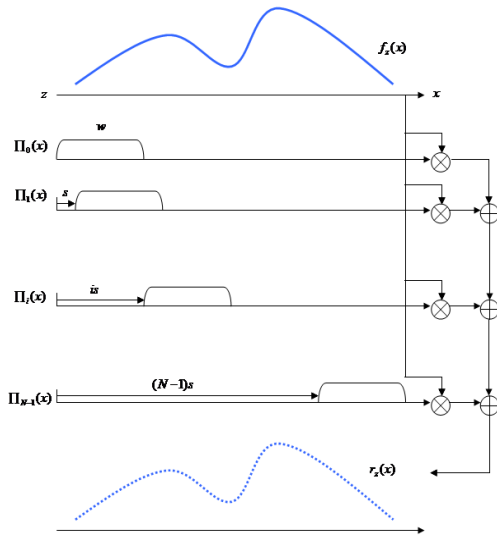


그림 3. 원신호와 복원신호 사이의 관계 설명.
Fig. 3. Illustration of relationship between original signal and reconstructed signal.

그림 3의 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 $\pi_i(x/w) = \pi_0((x - ia)/w)$ 이고, N 은 요소영상의 개수이며, w 는 윈도우의 크기이다. 여기서 $\pi(x)$ 를 이동 윈도우 함수(shifted 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 이동변수 a 는 요소영상크기다.

화소 대 화소 매핑을 활용한 컴퓨터 복원 과정은 그림 2에서도 알 수 있듯이 화소 핀홀을 거쳐서 복원 평면위로 한점으로 수렴한다. 역투사 방식은 화소가 하나의 평면으로 판단하여 확대되어 면으로 수렴하는 것과 대조를 이룬다. 이를 도식화 하면 그림 4와 같다.

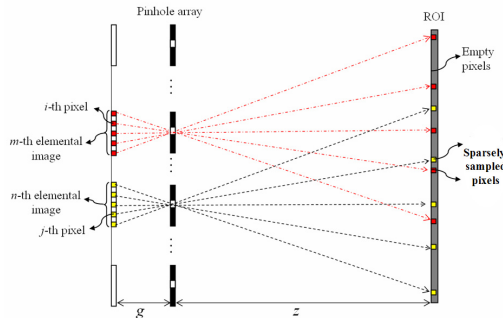


그림 4. 화소 대 화소 매핑 과정.
Fig. 4. Process of pixel-to-pixel mapping.

화소 대 화소로 매핑하면 그림 4의 복원 거리 z 위치에서의 화소들이 매핑이 된다. 그런데 여기서 중요한 점은 복원 평면위의 특정 화소들은 어떠한 요소 영상의 화소들과도 서로 매핑 관계가 생기지 않는 것이다. 이를 빈 화소(empty pixel)이라 한다[6]. 만약에 요소 영상 배열의 화소들과 복원 평면 화소들이 동일한 크기 및 동일한 샘플 간격을 갖는다면 빈 화소가 발생한다는 것은 어딘가 다른 위치는 요소 영상 화소가 중복된다는 것을 의미한다. 따라서 점 패턴 영상이 발생한다. 선행 논문에서는 이런 점 패턴 영상의 빈 화소를 채우기 위한 방안으로 보간법을 사용하였다[6].

III. Granular 잡음 해석

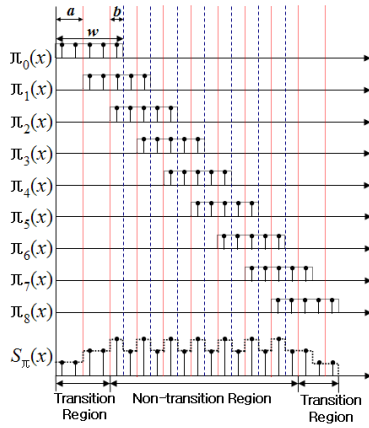


그림 5. 표본화된 윈도우 중첩 모델.
Fig. 5. Superposition model of sampled windows.

그림 4와 같은 화소 대 화소 매핑 과정을 앞서 설명한 신호 모델에 적용하면 그림 3에 주어진 윈도우 모델은 그림 5와 같은 표본화된 윈도우 모델로 바뀌게 된다. 점선으로 도시된 것은 사각 윈도우와 중첩에 따른 윈도우의 합 함수이다. 비천이 구역(non-transition region)에서 윈도우 합 함수가 일정한 값을 갖지 않는 것은 그레놀라 잡음이 발생한 것이다. 이는 다음과 같은 수식에서 이해할 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 그레놀라 잡음과 관련이 되어 있음을 확인할 수 있다. 따라서 b 가 0이 되는 조건이 그레놀라 잡음(GN)이 존재하지 않은 조건이다. 이를 GN-free 조건이라고 한다[7].

그레놀라 잡음이 존재하지 않는 조건에서 즉 $b=0$ 일 때 또는 w 와 a 가 정수배 관계가 될 때 화소 매핑 방식에서 표본화된 윈도우 모델을 그려보면 그림 6과 같이 얻어진다. 그림 6(a)에서 알 수 있듯이 비천이 구역이 사각 윈도우 합 함수를 표본화하는 모양새를 보여준다. 또한 표본화된 윈도우 합 함수에서 빈 화소의 존재를 확인할 수 있다.

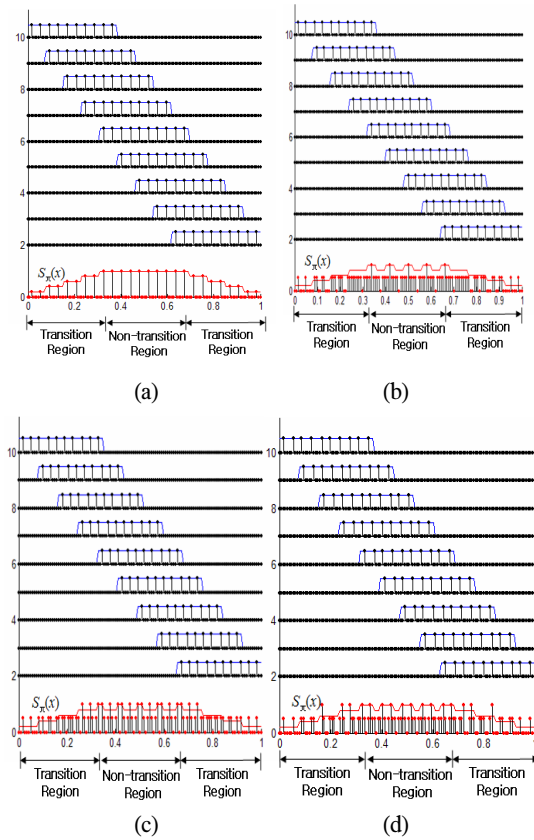


그림 6. 표본화된 윈도우 중첩 ($a=10$)
(a) $z/g=5$ (b) $z/g=4.5$, (c) $z/g=4.3$, (d) $z/g=4.7$.
Fig. 6. Superposition of sampled windows ($a=10$)
(a) $z/g=5$ (b) $z/g=4.5$, (c) $z/g=4.3$, (d) $z/g=4.7$.

그림 6은 화소 매핑 기반의 표본화된 윈도우의 중첩에 대해서 다양한 거리별 결과를 보여주고 있다. 특히 그림 6(b)-(d)는 그레놀라 잡음이 존재하는 상황을 보여준다. 여기서 해석할 수 있는 것은 연속적인 사각 윈도우의 중첩과 달리 표본화된 샘플들의 중첩에서는 화소 간 정렬이 맞지 않아서 윈도우 합 함수에서 화소들이 분산되는 것을 확인할 수 있다. 즉, 그레놀라 잡음이 없는 위치에서는, 그림 6(a)에서와 같이, 윈도우합 함수의 표본화 과정을 이해할 수 있지만 그레놀라 잡음이 실제로 존재하는 위치에서는 화소들이 분산되어 윈도우 합 함수의 표본화로 해석할 수 없다는 것이다. 따라서 화소 매핑 방식에서의 그레놀라 잡음은 공식으로 얻어내는 어렵고 수치 계산에 의해서 그 특성을 파악할 수밖에 없다.

IV. Granular 잡음의 수치 계산
실험 및 해석

화소 매핑 기반 컴퓨터 복원에서 복원 평면의 임의의 위치에서는 일반적으로 그레놀라 잡음이 발생한다. 이 잡음을 수치적으로 계산하기 위해서 먼저 그레놀라 잡음의 파워를 측정하는 도구를 다음과 같이 정의한다.

$$P_{GN} = \frac{1}{T} \int_T (S_{\pi}(x) - m)^2 dx \quad (3)$$

여기서 $S_{\pi}(x)$ 는 윈도우 합 함수이고 m 은 비천이구역에서의 $S_{\pi}(x)$ 의 평균값이다. T 는 비천이 구역을 의미하고 빈 화소 영역은 제외된 영역을 의미한다. T 구간에 빈 화소 영역을 제외하는 것은 빈화소 영역으로 인해서 그레놀라 잡음의 파워가 과장될 수 있고 실제로 빈 화소 영역은 화소 매핑 기반 방식에서 보간법에 의해서 채워짐으로 그레놀라 잡음의 파워 계산에서는 제외하는 것이 합당하기 때문이다. 참고로 식(3)의 연산은 표본화된 데이터에서는 빈 화소를 제외한 영역에서의 분산으로 계산할 수 있다.

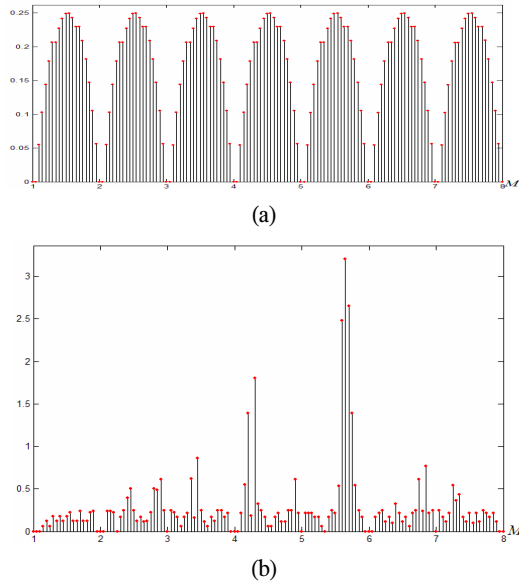


그림 7. 그레놀라 잡음, 요소영상크기=17
(a) 역투사방식 (b) 화소 매핑 방식
Fig. 7. Granular noise, elemental image size=17
(a) back-projection method (b) pixel mapping method.

그림 7은 기존의 역투사 방식에서의 그레놀라 잡음에 대한 파워를 식(3)에 의거해서 실험적으로 구한 결과이다. 그림 7(a)의 결과에서도 알 수 있듯이 정수거리 위치에서 그레놀라 잡음이 영이 되고 0.5 위치에서 가장 큰 잡음의 강도를 보이는 것이 확인되었다. 이는 기존의 연구와 동일한 패턴을 갖는다. 그림 7(b)는 화소 매핑 방식에서의 그레놀라 잡음으로 정수 거리 위치에서 그레놀라 잡음이 영이 됨을 확인할 수 있다. 하지만 잡음의 강도에 대한 패턴은 쉽게 이해되지 않는다. 따라서 화소 매핑 방식에서의 그레놀라 잡음의 패턴을 알기 위해서 더 넓은 영역의 거리에서 실험을 추가 하였다.

그림 8에서는 요소영상크기가 17과 30인 경우에 대해서 거리도 넓은 영역에 대해서 그레놀라 잡음에 대한 파워를 측정하였다. 그림 8에서 보이듯이 잡음의 강도가 가장 큰 부분은 요소영상크기와 같은 거리에서의 위치 근방인 것을 확인할 수 있다. 정확히 정수 위치에서는 잡음 강도가 영이 되지만 조금만 벗어난 위치에서는 잡음의 강도가 매우 강해지는 것이다. 이는 화소 매핑 방식의 컴퓨터 집적 영상 복원에서 중요한 특성으로 활용될 수 있다.

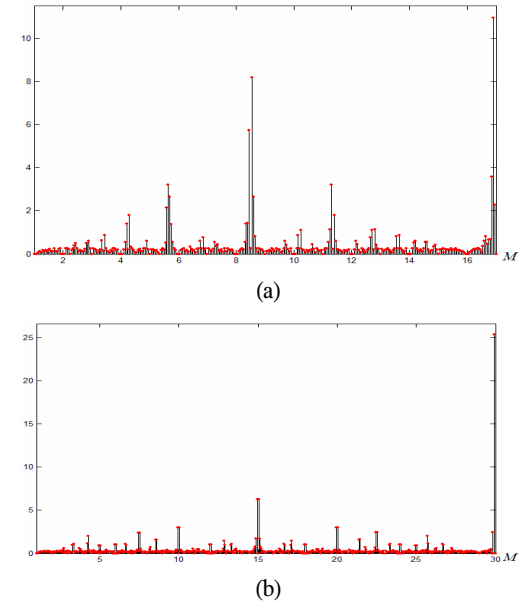


그림 8. 화소 매핑 방식에서의 그레놀라 잡음
(a) 요소영상크기=17 (b) 요소영상크기=30
Fig. 8. Granular noise in pixel mapping method
(a) elemental image size=17 (b) elemental image size=30.

또한 그림 8(a)와 (b)에서 보면, 요소영상크기 위치 ($M=17, 30$)에서 가장 큰 그레놀라 잡음이 보이고 요소영상크기의 절반 위치($M=8.5, 15$)에서 공통적으로 다음 크기의 잡음이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한 요소영상크기의 $1/3, 2/3$ 지점에서도 그 다음 크기의 잡음이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 특히 그림 8(b)는 $M=15$ 위치는 그레놀라 잡음이 없는 위치지만 조금만 비껴나간 위치에서는 그레놀라 잡음이 강하게 발생하는 것을 보여 주고 있고 그림 8(a)는 요소영상크기가 2 또는 3으로 나누어도 정수위치가 아닌 크기로 그레놀라 잡음이 강한 부분과 정확히 정수위치라서 그레놀라 잡음이 전혀 없는 부분이 중첩되지 않는 것을 보여준다.

V. 결론

본 논문에서는 화소 맵핑 방식의 컴퓨터 집적 영상 복원 기술의 신호 모델을 설명하고, 이를 통하여 CIIR 기술에 발생하는 잡음특성을 분석하였다. 컴퓨터 계산을 통하여 화소 맵핑 방식에서도 정수 위치에서의 GN-free 위치를 확인하였다. 또한 그레놀라 잡음의 강도의 변화가 역투사 방식에서와는 달리 요소 영상의 크기와 관련된 특정 위치에서 강한 잡음이 발생함을 확인 하였다. 이런 결과는 화소 맵핑 방식에서의 3차원 영상 복원시 영상 화질에 미칠 영향을 알려주는 중요한 자료로 활용할 수 있다.

참고문헌

- [1] G. Lippmann, "La photographie 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] D.-H. Shin and H. Yoo, "Computational integral imaging reconstruction method of 3D images using pixel-to-pixel mapping and image interpolation," Elsevier Optics Communications, vol. 282, no. 14, pp. 2760-2767, 15 July 2009
- [7] 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.
- [8] D.-H. Shin and H. Yoo "Generalized signal model and granular-noise analysis of computational image reconstruction for curved integral imaging systems," Appl. Opt., Vol. 48, pp. 827-833, 2009.
- [9] 신동학, 유훈, "평면기반 컴퓨터 집적 영상 복원 기술의 신호 모델을 이용한 3D 복원 영상 분석," 한국해양정보통신학회논문지, 제13권 1호, pp. 121-126, 2009년 1월

저자소개

유 훈(Hoon Yoo)

한국해양정보통신학회 논문지
제15권 제5호 참조