
합성 촬영 집적 영상의 신호 모델 해석 방법

유 훈*

Analysis method of signal model for synthetic aperture integral imaging

Hoon Yoo*

이 논문은 2010년도 상명대학교 연구비를 지원받았음

요 약

합성 촬영 집적 영상 (synthetic aperture integral imaging; SAI) 기술은 하나의 카메라를 이동하여 3D 물체에 대한 다시점 영상을 획득하여 깊이 정보의 3D 영상을 복원이 가능한 기술이다. 이 방법은 크게 3D 물체의 요소 영상을 픽업하는 과정과 픽업된 요소 영상을 이용하여 컴퓨터 기반으로 3D 깊이 영상들을 복원하는 두 과정으로 나눈다. 본 논문에서는 이 SAI에 대한 신호 모델을 설명하고, 이를 통하여 발생하는 잡음을 정의하고 해석하였다. SAI에 대한 신호 해석을 통하여 다시점 영상을 얻기 위한 카메라 이동 거리를 줄임으로써 영상 잡음감소와 계산 속도 개선을 동시에 얻을 수 있음을 보고한다.

ABSTRACT

SAI (synthetic aperture integral imaging) is a useful technique to record many multiview images of 3D objects by using a moving camera and to reconstruct 3D depth images from the recorded multiviews. This is largely composed of two processes. A pickup process provides elemental images of 3D objects and a reconstruction process generates 3D depth images computationally. In this paper, a signal model for SAI is presented. We defined the granular noise and analyzed its characteristics. Our signal model revealed that we could reduce the noise in the reconstructed images and increase the computational speed by reducing the shifting distance of a single camera.

키워드

3차원 디스플레이, 합성촬영집적영상, 집적영상, 컴퓨터 복원

Key word

3D display, SAI, Elemental images, Computational reconstruction

I. 서론

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 [2-6].

최근 3D 영상 획득 및 디스플레이를 위한 집적 영상 기술은 크게 2가지 방법으로 나눌 수 있다. 하나는 렌즈 배열을 이용하여 3D 물체에 대한 무수히 많은 요소 영상을 획득하고 이 획득된 요소 영상을 이용하여 3D 영상을 복원하는 렌즈 배열 기반의 직접 영상 방식이다 [2-6]. 이 방법은 픽셀수가 제한된 하나의 CCD를 이용하여 병렬적으로 많은 요소 영상을 얻을 수 있는 방법이지만, 각각의 요소 영상의 해상도가 낮다는 문제점이 있다. 이 방식과는 달리 요소 영상의 해상도를 극대화하기 위해서 하나의 카메라를 이동하면서 요소 영상을 시간 분할하여 획득하는 방법인 합성 촬영 집적 영상(synthetic aperture integral imaging; SAII)이 제안되었다 [7-9]. 이 방법은 높은 해상도의 요소 영상을 획득할 수 있어서 고해상도 3D 영상을 복원할 수 있는 방법이다.

저자는 최근 렌즈리트 배열을 사용하는 집적 영상 기술에 신호 해석 모델을 제안한 바 있다 [10-11]. 신호 해석은 집적 영상 기술에서 발생하는 잡음 특성을 분석하고 이를 개선하는 방법을 제공하기 때문에 3D 영상 복원에 유용하게 사용되어 질 수 있다.

본 논문에서는 이 SAII 방식의 신호 해석 모델을 제안하고 모델을 사용하여 영상 잡음에 대한 분석을 수행하고 그 특성을 보고한다.

II. SAII

SAII 기술은 일반적으로 그림 1과 같이 픽업 과정과 복원 과정으로 나누어진다. 집적 영상의 픽업 과정에서

3D 물체 정보를 하나의 카메라를 이용하여 요소 영상으로 기록한다. 따라서 요소 영상의 해상도는 사용한 카메라의 해상도와 동일하다. SAII에서는 많은 요소 영상을 얻기 위해서 카메라를 일정한 간격으로 상하좌우로 이용하여 2차원 구조의 요소 영상을 획득한다. 서로 다른 위치에서 획득된 요소 영상들은 3D 물체에 대한 서로 다른 영상 정보를 가지고 있기 때문에 3D 영상으로 복원이 가능하게 한다.

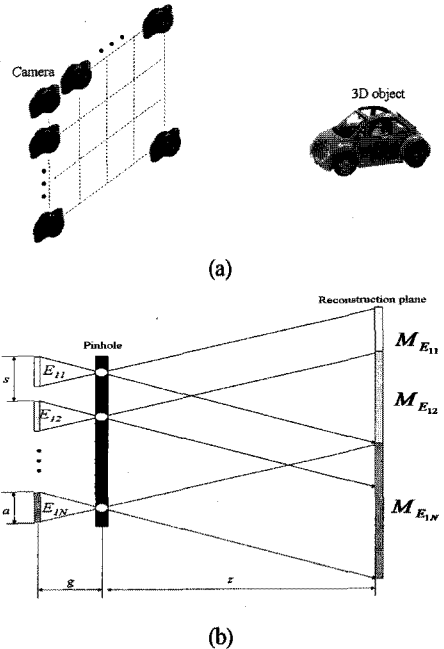


그림 1. SAII (a) 픽업 (b) 재생
Fig. 1. SAII (a) pickup (b) reconstruction

다음으로 재생 과정은 픽업 과정의 역 과정이다. 이 과정에서는 픽업 과정에서 얻어진 2차원 요소 영상을 컴퓨터를 활용하여 복원하고, 이 방법을 컴퓨터 집적 영상 복원 (computational integral imaging reconstruction; CIIR) 이라 부른다. 이 방법이 평면기반 CIIR 방법이다. 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 z에서 확대된 인접한 요소영상들과 서로 중첩된다. 3D의 입체감있는 정보를 재생하기 위해서 재생하고자 하는 모든 영상 평면들에 대응하는 거리에서 위와 동일한 과정을 반복한다.

III. SAI의 해석을 위한 신호 모델

기존의 집적 영상에 대한 신호 해석 방법은 이전의 논문에서 자세히 분석되었다 [10]. 그러나 SAI가 최근 활발히 연구되고 있지만, SAI에 대한 신호해석은 아직까지 보고된 적이 없다. 따라서 본 논문에서는 기존의 집적 영상 신호 해석 모델을 기반으로 하여 SAI에 대한 신호 해석을 처음으로 수행하고자 한다.

SAI에서 복원되는 영상의 신호 해석을 위해서는 먼저 전체 시스템을 분석하여야 한다. 이를 위해서 그림 2의 1차원적인 신호 모델을 고려하자. 이 모델은 그림 1의 시스템 구조를 모델링 하였으며, 픽업과정과 재생 과정의 대칭적인 구조를 가진다. 그림 2에서 먼저 픽업과정을 고려하자. 이때 렌즈 배열로부터 z 거리에 위치한 물체 평면의 세기 신호를 $f_z(z)$ 라고 하자. 그러면 $f_z(x)$ 신호는 렌즈 배열을 통해서 특정한 윈도형태로 요소영상으로 매핑이 이루어진다. 다음으로 CIIR 재생 과정의 신호 모델을 고려하자.

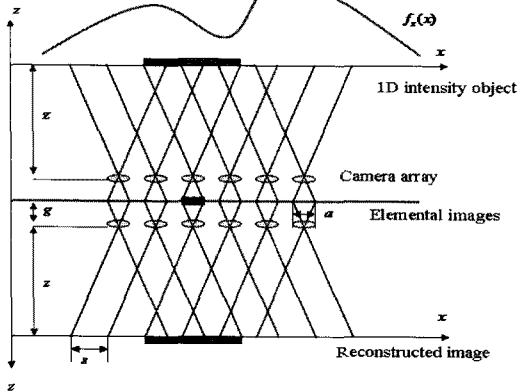


그림 2. SAI 시스템 분석을 위한 신호 모델
Fig. 2. Signal model for the analysis of SAI

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

그림 2의 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 윈도형태의 버전들의 선형 합으로 고려할 수 있다. 여기서 픽업과정에서 $f_z(x)$ 신호의 윈도우 과정, 역전(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 3의 구조로부터 CIIR로부터의 복원 신호 $r_z(x)$ 는 원 신호 $f_z(x)$ 의 윈도우 버전의 합임을 알 수 있다.

이를 수식으로 표현하면

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

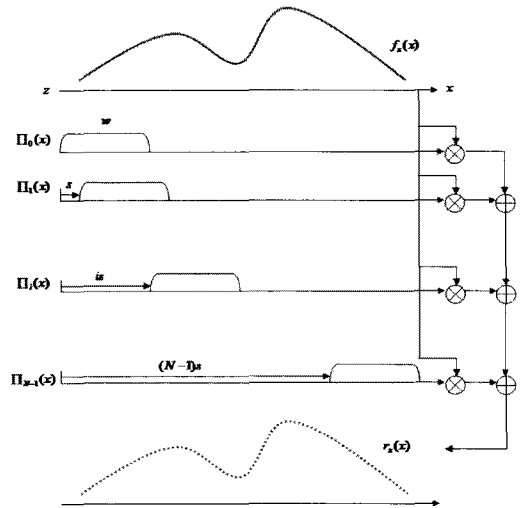


그림 3. 원신호와 복원신호 사이의 관계 설명
Fig. 3. Illustration of relationship between original signal and reconstructed signal

여기서 $\pi_i(x/w) = \pi_0((x - is)/w)$ 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 s 는 임의로 정할 수 있는 변수이다. 기존의 집적 영상 신호 해석 방법과는 달리 SAII에서는 이동변수 s 를 임의로 결정할 수 있는 특성을 가진다. 만약 s 가 요소영상의 크기 a 와 동일하다면 기존의 집적 영상 신호 해석 결과와 동일하다.

IV. Granular 잡음 해석과 모의 실험

복원 신호의 정확한 해석을 위하여 그림 5는 9개의 SWF의 중첩에 대한 예를 보여준다. 각각의 이동 윈도우의 크기가 w 이고 이동 변수 s 이다. 여기서 우리는 그림 4의 제일 아래 그림에서 보이는 granular 성분을 정의할 수 있다. 이 값은 복원 신호에서 원치 않는 신호이기 때문에 granular 잡음이다. 이 granular 잡음을 올바르게 해석하기 위해서 그림 4를 살펴본다. 여기서 w 는 s 의 값으로 나누어지면서 나머지가 b 가 된다. 이의 관계를 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

여기서 n 은 정수 값이고, b 는 0과 s 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 2로부터

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

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

$$b = aM - ns = 0 \quad (4)$$

즉 $M=z/g$ 가 정수일 때에 $b=0$ 이 된다. 사실 GN-free 조건은 보정 과정을 추가하지 않아도 정확하게 신호를 복원하는 조건이다. 따라서 GN-free 조건만을 사용한다면 고속의 신호 복원이 가능하게 되고 광학적 복원에서는 깨끗한 상이 맺히는 위치를 알려주는 식이 된다.

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.

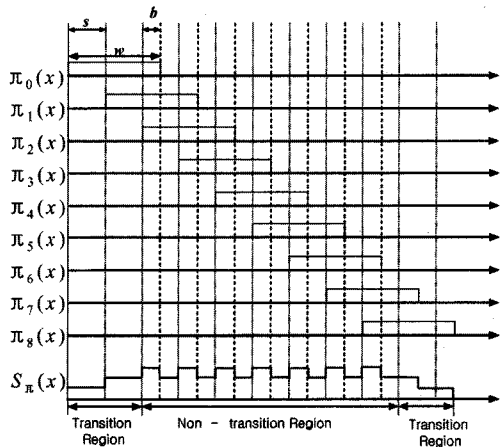


그림 4. (a) 9개의 SWF의 중첩의 예.
Fig. 4. (a) Example of the sum of nine SWFs.

다음으로 본 논문의 SAII 신호 해석에 대한 자세한 분석을 수행하였다. SAII 신호 해석 방법에서는 기존의 집적 영상 신호 해석 방법과는 달리 이동 변수 s 가 임의로 결정될 수 있는 변수이었다. 따라서 s 값의 변화에 대한 특성을 관찰할 수 있다. 그림 1의 SAII 모델에서 사용한 카메라의 ccd 크기를 35 mm, 카메라 렌즈의 초점거리를 50 mm라고 가정한다.

먼저 s 에 따른 granular 잡음 특성을 계산하였다. 잡음의 양은 그림 4에서 보여지듯이 식 (2)를 이용하여 계산할 수 있다. 몇몇 s 값에 대해서 계산된 잡음의 양을 그림 5에 이를 나타내었다. 그림 5의 결과로부터 s 가 작을수록 잡음의 양이 작아짐을 알 수 있다.

다음으로 s 에 따른 GN-free 위치들을 계산하였다. 이를 위해 식 (4)를 이용하였다. 그림 5에서 GN-free 위치는 $b=0$ 이 되는 값들의 위치가 되며, 이들 사이의 거리를 GN-free 거리로 정의하면, s 변수에 따른 GN-free 거리의 특성을 그림 6과 같이 얻을 수 있다. 즉, s 가 작을수록 GN-free 위치 간격이 작아져서 GN-free를 얻을 수 있는 조건들이 더 많아 짐을 알 수 있다.

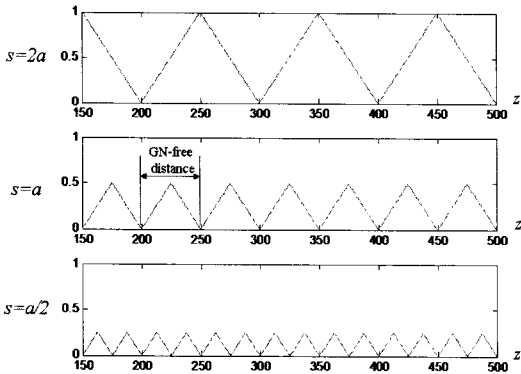


그림 5. Granular 잡음의 양
Fig. 5. Amount of granular noise

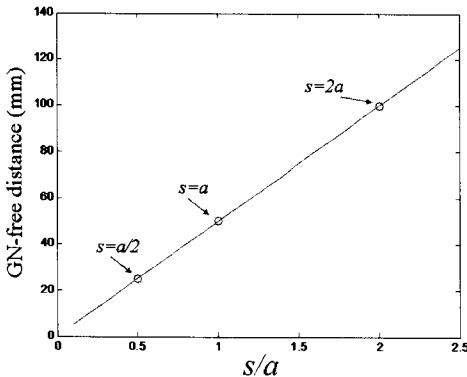


그림 6. GN-free distance의 계산
Fig. 6. Calculation of GN-free distance

그러나 무조건 s 를 작게 할 수는 없다. s 가 작을수록 주어진 영역 내에서 요소 영상을 그 만큼 많이 획득 및 저장하여야 하고 이는 3D 영상 복원을 위한 컴퓨터 계산량을 극대화 시킬 수 있다. 따라서 요소 영상의 개수와 이동변수 s 사이에 적절한 절충점이 존재할 수 있다.

V. 결론

결론적으로 본 논문에서는 SAI 기술의 신호 모델을 설명하고, 이를 통하여 CIIR 기술에 발생하는 잡음특성을 이동변수 s 에 대해서 분석하였다. 컴퓨터 계산을 통하여 SAI에서 이동변수 s 가 작을수록 잡음의 양을 줄일 수 있고 또한 빠른 계산을 위한 GN-free 위치들을 더 많이 만들 수 있음을 확인하였다. 본 논문에서의 신호 해석 모델을 이용하여 SAI 기반의 3D 실험에서 해상도 개선 및 계산 속도 향상이 가능하며, 이를 이용하여 3D 깊이 추출이나 3D 영상 인식 분야에 유용하게 적용되어질 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2007-331-D00332).

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] 신동학, 김남우, 이준재, 김은수 "원형 매핑 모델에 기초한 3차원 영상의 평면기반 컴퓨터 집적 영상 재생 방식", 한국해양정보통신학회 논문지, 제11권5호, pp. 991-996, 2007.
- [7] J. -S. Jang, B. Javidi, "Three-dimensional synthetic aperture integral imaging," *Opt. Lett.* Vol. 27, pp. 1144-1146, 2002.
- [8] Y. Hwang, S. Hong, and B. Javidi, "Free View 3-D Visualization of Occluded Objects by Using Computational Synthetic Aperture Integral Imaging," *IEEE J. Display Tech.* Vol. 3, pp. 64-70, 2007.
- [9] B. Tavakoli, M. DaneshPanah, B. Javidi, and E. Watson, "Performance of 3D integral imaging with position uncertainty," *Opt. Express* Vol. 15, pp. 11889-11902, 2007.
- [10] 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.
- [11] D.-H. Shin and H. Yoo "Generalized signal model and analysis of computational image reconstruction for curved integral imaging systems," *Appl. Opt.*, Vol. 48, pp. 827-833, 2009.

저자소개

유 훈(Hoon Yoo)

한국해양정보통신학회 논문지
제12권 12호 참조