

# 3차원 집적 영상 시스템의 최적 파라미터

조명진\* · 이병국\*\*

\*한경대학교 \*\*동서대학교

## Optimum parameters of 3D integral imaging system

Myungjin Cho\* · Byonggook Lee\*\*

\*Hankyong National University, \*\*Dongseo University

E-mail : mjcho@hknu.ac.kr

### 요 약

집적 영상 (Integral Imaging) 기술은 3차원 이미징 (Imaging)과 디스플레이를 위한 기술이다 많은 파라미터들이 3차원 집적 영상 시스템의 성능에 영향을 준다 3차원 시스템 성능의 척도 (Performance Metric)를 정의하고 이러한 파라미터들을 최적화함으로써 향상된 시스템 성능을 얻을 수 있다. 본 논문에서는 주어진 시스템 조건하에서 성능 척도를 사용하여 3차원 집적 영상 시스템의 성능을 최적화하는 방법에 대해 설명한다 이 분석에서 성능 척도를 최적화하기 위해 렌즈의 개구수 (Numerical Aperture), 영상 센서간의 거리, 영상 센서의 수, 픽셀 크기, 그리고 픽셀 수와 같은 시스템 파라미터들을 최적화하여 선택한다 이미징 처리과정을 설명하기 위해 파동 광학(Wave Optics)을 사용하였다.

### ABSTRACT

Integral imaging is a promising technology for 3D imaging and display. Many parameters affect the performance of 3D integral imaging systems. Enhanced system performance is acquired by optimization of these system parameters with respect to defined performance metrics. In this paper, we present an approach to optimize the performance of 3D integral imaging system in terms of performance metrics under fixed resource constraints. In this analysis, system parameters such as lens numerical aperture, pitch between image sensors, the number of image sensors, the pixel size, and the number of pixels are determined to optimize performance metrics. Wave optics is utilized to describe the imaging process.

### 키워드

3차원 집적 영상, 성능의 척도, 최적화, 파동 광학

### 1. 서 론

집적 영상은 3차원 이미징, 3차원 TV, 3차원 디스플레이를 위한 기술이다 [1-4]. 3차원 응용분야에 대한 집적 영상 방식은 스테레오나 홀로그래픽 방식을 넘어 많은 장점이 있다 [5-6]. 홀로그래피와는 달리 집적 영상은 주변 광원을 사용할 수 있고 스펙클 잡음이 없다. 스테레오와는 달리 무안경식 완전 시차와 수렴조절 불일치가 없다.

집적 영상은 3차원 장면의 정보를 얻기 위해 다시점의 2차원 영상 (요소 영상)을 기록한다. 영상 기록 단계에서 서로 다른 원근감을 가지는 2

차원 요소 영상을 기록하기 위해 여러 개의 영상 센서나 렌즈 배열을 사용해도 된다. 이러한 2차원 시점 영상들을 사용하여, 3차원 영상을 광학적으로나 디지털적으로 재생할 수 있다. 3차원 집적 영상 시스템의 성능은 다양한 파라미터에 영향을 받는다. 향상된 성능을 얻기 위해, 이러한 파라미터들을 최적화할 필요가 있다 [9]. 측면 해상도와 깊이 해상도를 포함해서 3차원 집적 영상의 다양한 성능 척도들이 고려되어도 된다 [4].

본 논문에서는, 주어진 성능 척도에 대한 시스템 파라미터를 최적화함으로써 3차원 집적 영상 시스템 성능을 분석하는 방법에 대해 기술한다

집적 영상의 성능은 촬영 렌즈의 개구수 시스템의 시차, 영상 센서간의 거리, 영상 센서의 수, 픽셀 크기, 픽셀 수 등과 같은 많은 시스템 파라미터들에 의해 결정된다. 집적 영상 시스템의 3차원 성능을 향상시키기 위해, 시스템의 특성을 나타내는 분석적 표현식을 사용하고 brute force 검색 알고리즘 [7]을 사용하여 성능의 척도를 최적화함으로써 최적의 파라미터를 결정한다. 성능의 척도에 대해, 3차원 집적 영상 시스템의 성능의 척도인 깊이 해상도와 측면 해상도 제품의 곱으로 정의된 재생 voxel의 부피를 사용한다. 다른 성능의 척도가 사용되어도 된다.

## II. 렌즈의 point spread function (PSF)과 영상 센서의 픽셀화를 사용한 3차원 집적 영상 시스템의 영상 촬영 처리

그림 1은 3차원 집적 영상의 영상 촬영 처리를 나타낸다. 단순화를 위해 3차원 물체는 점광원이라고 가정한다.

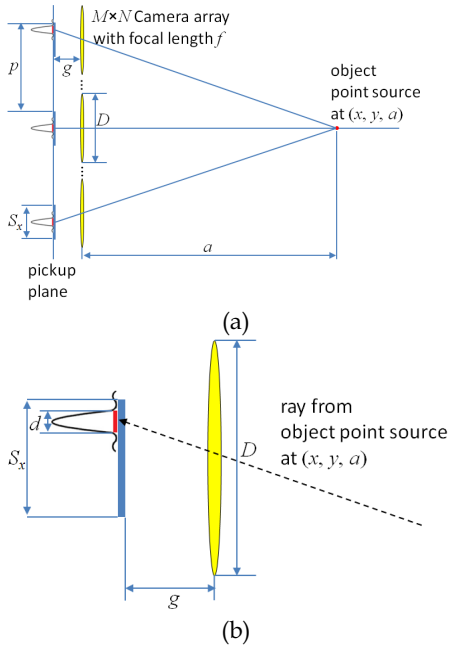


그림 1. 3차원 집적 영상에서 이미지 촬영 (a) 촬영 처리, (b)촬영 렌즈의 PSF

그림 1(a)에서, 기록 렌즈와 물체간의 거리는 a이다. 3차원 집적 영상 시스템은 사각 구조로 배열된 M×N개의 카메라를 가지고 있다. 각 카메라는 f 초점거리와 직경 D를 가지는 렌즈가 있다. 이 렌즈의 PSF는 그림 1에 나타나 있다. 각 센서의 크기는 S<sub>x</sub>이다. 카메라간의 거리는 p이다. 기록 평면과 렌즈간의 거리는 렌즈 공식에 따라 g=fa/(a-f)이다. 그림 1(b)의 PSF의 central lobe의 너비는 다음 식으로 구할 수 있다 [8].

$$d = 2.44 \frac{\lambda g}{D} \quad (1)$$

여기서 λ는 빛의 파장이다.

식 (1)을 사용하여 그림 2(a)에 나타나 있는 각 영상 센서에서의 점광원의 실제 촬영 위치를 구할 수 있다 [3].

$$x_a^m = mp(1 - M_z) + M_z x \pm \frac{d}{2} \quad (2)$$

여기서 m=(m<sub>x</sub>, m<sub>y</sub>)는 렌즈의 인자, M<sub>z</sub>=-g/a는 촬영 처리의 축소율, 그리고 x=(x, y)는 거리 a에서 3차원 점광원의 위치이다.

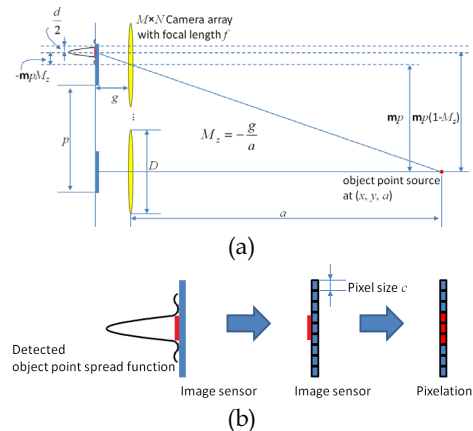


그림 2. (a) 점광원의 실제 촬영 위치, (b) 영상 센서의 픽셀화로 인한 효과

하지만 일반적으로 영상 센서는 제한된 픽셀 수를 가진다. 그러므로, 그림 2(b)에 나타나 있는 것처럼 각 렌즈의 실제 촬영 위치의 픽셀화를 수행해야 한다. 픽셀화는 다음과 같이 수행될 수 있다.

$$x_p^m = c \left\langle \frac{x_a^m - mp - M_z x}{c} \right\rangle + mp + M_z x \quad (3)$$

$$x_{p1}^m = c \left\lceil \frac{-mpM_z - d/2}{c} \right\rceil + mp + M_z x \quad (4)$$

$$x_{p2}^m = c \left\lfloor \frac{-mpM_z + d/2}{c} \right\rfloor + mp + M_z x$$

여기서 < > 는 픽셀화 연산자, [ ] 는 버림 연산자, [ ] 는 올림 연산자, c는 촬영 영상 센서의 픽셀 크기, x<sub>p</sub><sup>m</sup>은 픽셀화된 촬영 위치 범위, x<sub>p1</sub><sup>m</sup>, x<sub>p2</sub><sup>m</sup>은 픽셀화 후에 투영되는 촬영 위치의 경계 위치이다. 촬영 처리에서, 각각의 렌즈에 대한 픽셀화된 촬영 위치는 식 (3)과 (4)를 사용하여 얻어진다.

### III. 측면, 깊이 해상도와 voxel 부피

그림 3(a)는 컴퓨터 재생 기법을 이용한 3차원 집적 영상의 측면 해상도를 설명한다 [2]. 재생 처리에서, 3차원 물체의 각각의 기록된 픽셀은 고정된 재생 평면상에 역투영된다. 각각의 픽셀화된 촬영 위치의 영상의 경계에 대한 역투영 위치는 다음 식으로부터 구해진다.

$$x_{b1}^m = \frac{x_{p1}^m - mp(1 - M_z)}{M_z} \quad (5)$$

$$x_{b2}^m = \frac{x_{p2}^m - mp(1 - M_z)}{M_z}$$

재생 평면상에 공통으로 겹치는 영역은 그림 3(a)에 나타나 있는 것처럼 재생된 3차원 영상의 측면 voxel 크기로 간주된다. 그러므로 3차원 집적 영상 시스템의 측면 해상도는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$R_L = \frac{1}{|\min(x_{b1}^m) - \max(x_{b2}^m)|} \quad (6)$$

3차원 집적 영상 시스템의 깊이 해상도는 그림 3(b)에 나타나 있다. z축상에서, 점광원 요소 영상의 역투영 위치의 경계는 다음과 같다.

$$z_{b1}^m = \frac{f(x_{p1}^m - x)}{x_{p1}^m - mp} \quad (7)$$

$$z_{b2}^m = \frac{f(x_{p2}^m - x)}{x_{p2}^m - mp}$$

유사하게, z축을 따라 역투영되는 영상의 공통으로 겹치는 영역은 재생된 3차원 영상에 대한 voxel의 깊이 크기로 간주될 수 있다. 깊이 해상도는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$R_D = \frac{1}{|\min(z_{b1}^m) - \max(z_{b2}^m)|} \quad (8)$$

voxel 부피는 깊이 해상도와 측면 해상도 제공의 곱이고 3차원 집적 영상에 대한 최적의 파라미터를 구하기 위한 척도로써 사용될 것이다

$$V_s = \frac{1}{R_L^2 R_D} \quad (9)$$

성능 척도의 최적화는 3차원 집적 영상 시스템에 대한 최적의 파라미터를 생성한다 촬영 위치는 시스템 파라미터에 대한 불연속 함수이고 시스템 파라미터의 구속조건이 있기 때문에 척도의

최적화에 의해 구해지는 가장 좋은 3차원 성능에 대해 주어진 구속조건에서 모든 후보 파라미터들을 검사하는 brute force 검색 알고리즘을 사용하여 최적의 파라미터를 구할 수 있다 고려되는 시스템 파라미터는 촬영 렌즈의 초점거리와 직경 영상 센서간의 거리, 영상 센서의 수, 픽셀 크기, 픽셀 수, 카메라의 수, 그리고 시차들이다.

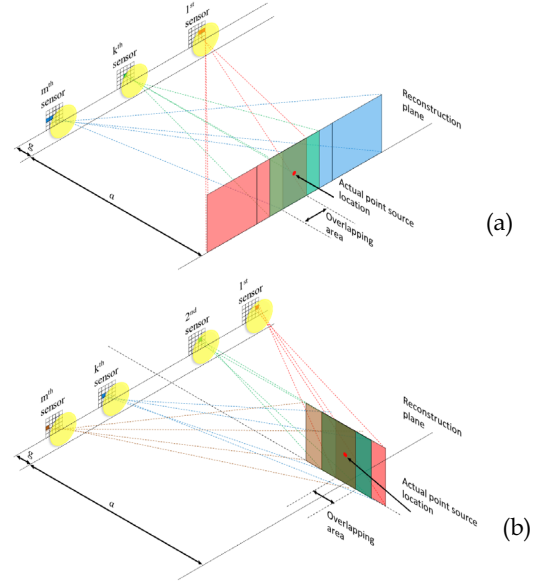


그림 3. (a) 측면 해상도, (b) 깊이 해상도.

### IV. 측면, 깊이 해상도와 voxel 부피

3차원 집적 영상 시스템에 대한 최적의 파라미터를 찾기 위해, 실제 상황에 대한 파라미터 구속조건을 고려한다. 표 1은 최적화 분석을 위한 구속조건들의 한 예이다 여기서 N은 영상 센서의 수, a는 촬영 렌즈로부터 물체의 거리, f/#는 렌즈의 f수,  $N_p$ 는 각 영상 센서의 픽셀 수, c는 영상 센서의 픽셀 크기,  $P_t$ 는 3차원 집적 영상 시스템의 전체 시차이다. 이러한 시스템 파라미터 구속조건은 상용 영상 장치와 부품의 사양이나 특정 응용 분야에 의해 결정될 수 있다.

표 1. 최적화 시뮬레이션에 사용된 시스템 파라미터 구속조건

f(mm)	D(mm)	N	$\lambda(\mu\text{m})$
50~500	1~150	2~200	0.5
f/#	$N_p$	c( $\mu\text{m}$ )	$P_t(\text{m})$
$\geq 1.2$	4000	5	1~100

그림 4는 다양한 시스템 파라미터를 가지는 집적 영상 시스템의 재생된 voxel 부피의 최소화에 대한 시뮬레이션 결과의 예를 보여준다 단순화를 위해, 시뮬레이션은 1차원의 경우에 대해서만 수행되었다.

일반적으로 디지털 영상 센서는 양자화 에러를 가진다. 게다가, 각각의 영상 센서의 3차원 물체

에 대한 촬영 위치는 양자화 에러를 가진다 그러므로, 그림 4에서 특이점이 관찰된다. 시뮬레이션 결과와 brute force 검색 알고리즘을 사용하여 주어진 구속조건에서 집적 영상 시스템의 요구되는 성능 척도를 최적화함으로써 최적의 시스템 파라미터를 구할 수 있다.

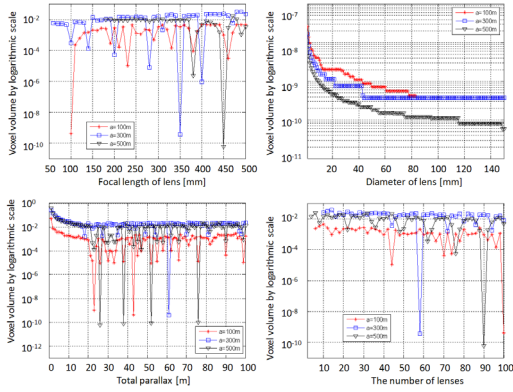


그림 4. 주어진 구속조건하에서의 시뮬레이션 결과

표 2는 표 1에 나와 있는 주어진 구속조건과 함께 영역  $(-100\text{mm} \leq x \leq 100\text{mm})$ 에 놓여 있는 3차원 물체에 대한 시스템 파라미터의 최적화 결과를 나타낸다. 시스템의 최적 파라미터는 센서로부터 물체의 거리가 바뀔에 따라 달라진다 voxel의 부피와 물체의 거리의 관계는 비선형으로 나타난다. 픽셀 크기가 작고 최적화 방법이 픽셀 내에서 PSF의 central lobe에 근접하는 값을 찾으려 하기 때문에 촬영 렌즈의 최적 직경은 구속조건의 최대값에 가까워진다 더 큰 픽셀 크기를 사용한다면 다른 결과를 얻을 것이다 게다가, 최적의 전체 시차는 측면과 깊이 해상도 사이의 균형에 의해 결정된다. 렌즈의 f수가 시스템 구속조건이 아닐 때에는 가장 작은 f수나 가장 큰 개구수가 최적의 렌즈 파라미터가 될 것이다 단순화를 위해 1차원 시뮬레이션을 하였다. 이 분석은 2차원에서도 유효하다.

표 2. 표 1에서 주어진 구속조건하에서의 최적화 시뮬레이션 후의 최적 시스템 파라미터

최적 파라미터	100m	200m	300m	400m	500m
f(mm)	100	350	350	150	450
D(mm)	78	136	44	115	149
p(mm)	434.3	380.3	1070.2	1403	292.1
N	100	72	58	68	90
$P_t$ (m)	43	27	61	94	26
$1/R_L$ (mm)	0.202	0.1207	0.0501	0.0995	0.025
$1/R_D$ (mm)	10.51	38.4	149.9	49.9	94.5
$V_s$ (mm <sup>3</sup> )	0.4292	0.5597	0.3766	0.4949	0.0589

### V. 결론

본 논문에서는, 주어진 구속조건하에서 성능의 척도를 최적화함으로써 3차원 집적 영상에 대한 최적의 시스템 파라미터를 구하는 방법에 대해

논의하였다. 주어진 물체 영역에 대해, 파라미터는 영상 센서의 수, 렌즈의 f수, 각 영상 센서의 픽셀 수, 영상 센서의 픽셀 크기, 영상 센서간의 거리, 3차원 집적 영상 시스템의 전체 시차를 포함한다. 사용된 척도는 재생된 voxel의 부피인데, 이것은 측면과 깊이 해상도의 곱에 종속된다 시스템 파라미터는 재생된 voxel 부피를 최적화하기 위한 다양한 시스템 파라미터를 선택하는 brute force 검색 알고리즘을 사용함으로써 구할 수 있다.

### 감사의 글

본 연구는 지식경제부 및 한국산업기술평가관리원의 산업융합원천기술개발사업(정보통신)의 일환으로 수행하였음. [10041682, 집적영상(IP) 깊이 표현 범위를 개선한 고성능 3D 영상 처리 기술]

### 참고문헌

- [1] G. Lippmann, "La photographie integrale," C. R. Acad. Sci., vol. 146, pp. 446-451, 1908.
- [2] S.-H. Hong, J.-S. Jang, and B. Javidi, "Three-dimensional volumetric object reconstruction using computational integral imaging," Opt. Exp., vol. 12, pp. 483-491, 2004.
- [3] M. Martinez-Corral, B. Javidi, R. Martinez-Cuenca, and G. Saavedra, "Integral imaging with improved depth of field by use of amplitude modulated microlens array," Appl. Opt., vol. 43, pp. 5806-5813, 2004.
- [4] C. B. Burckhardt, "Optimum parameters and resolution limitation of integral imaging," JOSA, vol. 58, pp. 71-76, 1968.
- [5] S. A. Benton and V. M. Bove, Holographic Imaging: Wiley-Interscience, 2008.
- [6] C. Wheatstone, "On some remarkable, and hitherto unobserved phenomena of binocular vision," Phil. Trans. Roy. Soc. London, vol. 128, pp. 371-394, 1838.
- [7] K. V. Price, R. M. Stom, and J. A. Lampinen, Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization, Berlin, Germany: Springer, 2005.
- [8] J. W. Goodman, Introduction to Fourier Optics, New York: McGrawHill, 1996.
- [9] Z. Kavehvas, K. Mehrany, and S. Bagheri, "Optimization of the lens array structure for performance improvement of integral imaging," Opt. Lett., vol. 36, pp. 3993-3995, 2011.