

Super Multi-view Display Method using Pin-hole Array

Jin-A Byeon¹, Ki-Chul Kwon², Munkh-Uchral Erdenebat², Jae-Hyeung Park³, Sung-Kyu Kim¹,
Jong-Jae Kim², and Nam Kim^{2†}

¹Imaging Media Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791, Korea

²College of Electrical & Computer Engineering, Chungbuk National University, Cheong-ju 361-763, Korea

³School of Information and Communication Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

(Received November 19, 2013; Revised manuscript December 30, 2013; Accepted January 3 2014)

In this paper a Super Multi-view display method using a pinhole array with full parallax was proposed. The proposed method was simulated and its parameters analyzed. Also, the distribution and irradiance of light through each pinhole on the retina receiver, according to the change of crystalline lens focal length, were found by simulation. As a result, an image free of blurring was obtained while the crystalline lens focused on the depth plane of the three-dimensional image created by the imaging lens.

Keywords: Super multi-view display, Full parallax, Pin-hole array

OCIS codes: (120.2040) Displays; (120.0120) Instrumentation, measurement, and metrology

핀홀어레이를 이용한 슈퍼 멀티-뷰 3D 디스플레이

변진아¹ · 권기철² · 몽흐오츠렐에덴바트² · 박재형³ · 김성규¹ · 김종재² · 김 남^{2†}

¹한국과학기술연구원 영상미디어연구센터
Ⓞ 136-791 서울시 성북구 하월곡동 39-1번지

²충북대학교 전자정보대학
Ⓞ 361-763 충청북도 청주시 흥덕구 개신동 52번지

³인하대학교 정보통신공학부
Ⓞ 402-751 인천광역시 남구 인하로 100

(2013년 11월 19일 받음, 2013년 12월 30일 수정본 받음, 2014년 1월 3일 게재 확정)

본 논문에서는 핀홀어레이를 사용한 완전시차 3D 방식의 초다시점 디스플레이를 제안한다. 이는 시점 이미지를 화면에 나타내는 디스플레이 장치, 완전시차의 구현을 위한 핀홀어레이, 시점 영상들을 동공에 동시에 투영시키기 위한 이미징 렌즈로 구성된다. 제안된 방법은 관찰자에게 수평 및 수직 시차가 동시에 제공되는 초다시점 디스플레이 방법이다. 이에 대한 파라미터들의 분석과 시뮬레이션을 통해 수정체 렌즈의 초점 거리만을 조절함에 따라, 망막에 분포하는 빛들의 분포 및 조도 변화를 확인하였으며, 수정체 렌즈가 이미징 렌즈를 통해 생성된 3D 이미지의 깊이면에 초점을 맺을 때에 가장 선명한 영상이 획득됨을 확인하였다.

Keywords: 초다시점 디스플레이, 완전시차, 핀홀어레이

OCIS codes: (120.2040) Displays; (120.0120) Instrumentation, measurement, and metrology

I. 서 론

인간은 시각, 청각, 촉각, 후각 및 미각의 오감을 가지고 있으며, 이러한 감각들로부터 주변 상황에 대한 정보들을 습득한다. 그 중 습득하는 정보의 80% 이상을 시각 정보로부터

인지하기 때문에 시각은 인간이 인지하는 감각의 중요한 부분을 차지한다.^[1]

인간은 두 눈을 통해 들어오는 정보로 3차원 물체를 인지할 수 있는데, 3차원 물체의 깊이감을 인지하는 요인으로는 경험에 근거하여 물체의 깊이감을 인지하는 심리적인 요인

†E-mail: namkim@cbnu.ac.kr

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

(psychological cues)과 관찰자에게 직접적으로 물리적인 자극을 제공하여 물체의 깊이감을 인지하는 생리적인 요인(physiological cues)이 있다. 3차원 디스플레이는 관찰자에게 생리적인 요인인 수렴(convergence), 초점 조절(accommodation), 양안 시차(binocular disparity), 운동 시차(motion parallax) 중 몇 가지를 제공함으로써 관찰자가 3차원 인지를 가능하도록 해준다.^[2]

3차원 디스플레이 장치는 관찰자의 안경 착용 유무에 따라 안경식(stereoscopic) 방식과 무안경식(autostereoscopic) 방식으로 나뉘며, 안경식 방식은 주로 양안 시차를 이용하여 구현된 방법으로 양안에 들어오는 정보를 시간 분할과 공간 분할의 여부에 따라 다시 분류된다. 그러나 안경을 착용하는 불편함은 관찰자에게 3차원 입체 영상 감상에 대한 거부감을 안겨 주므로 무안경식 방식에 관한 연구가 현재 활발히 진행되고 있다. 무안경식 방식의 종류로는 시차 격벽(parallax barrier), 렌티큘러 렌즈(lenticular lens), 집적 영상(integral imaging) 방식이 있으며, 모든 방향에서 3차원 영상을 관찰할 수 있는 체적형(volumetric) 방식과 홀로그래피(holography) 방식이 있다.^[3-9] 한편, 양안 시차를 바탕으로 하는 기존의 3차원 디스플레이는 초점 조절과 수렴의 불일치로 인하여 관찰자에게 시각피로를 유발한다. 이러한 한계점을 극복하고자 단안에 2개 이상의 시점을 투영하여 관찰자의 눈이 생성된 3차원 물체에 초점을 맺음으로써, 초점 조절과 수렴의 불일치를 해소하는 초다시점 디스플레이(super multi-view 3D display)가 개발되었다. 하지만 이러한 초다시점 디스플레이는 관찰자에게 수평시차만을 제공한다는 단점이 있다.

본 논문에서는 관찰자의 망막을 투사하는 핀홀어레이를 사용함으로써, 관찰자에게 수평시차뿐만 아니라 수직시차까지 제공하여 완전시차를 가지는 초다시점 디스플레이 방법을 제안하였다. 제안된 방법의 원리와 구조를 II장에 서술하였으며, III장에서 제안된 방법과 관련된 파라미터들을 분석하였으며, 생성된 3차원 영상의 깊이에 대한 초점 조절 측정 결과를 기술하였다.

II. 핀홀어레이를 사용한 초다시점 디스플레이 시스템

2.1. 초다시점 디스플레이의 개요

기존의 3차원 디스플레이는 인간의 깊이 인지에 대하여 초점 조절과 수렴의 불일치 및 운동 시차의 부재라는 두 가지 문제점을 가진다. 때문에 이러한 두 가지 문제점을 해결할 수 있는 초다시점 디스플레이 방법이 자연스러운 3차원 디스플레이로 제안되어 왔다. 초다시점 디스플레이 기술은 시점의 간격을 동공의 직경보다 더 작게 만들고, 그 결과 공간의 동일한 위치를 통하여 통과하는 두 개 혹은 그 이상의 광선들이 동시에 동공을 통하여 통과하게 된다. 이에 따라, 관찰자의 눈은 3D point에 초점을 맺을 수 있으며, 초점 조절 기능이 비로소 제대로 이루어지게 된다. 이로써, 초점 조절과 수렴이 일치할 수 있게 된다. 또한, 관측자에게 양안 시차 및 수렴뿐만 아니라 운동 시차, 그리고 폭주까지 제공하여 모든 생

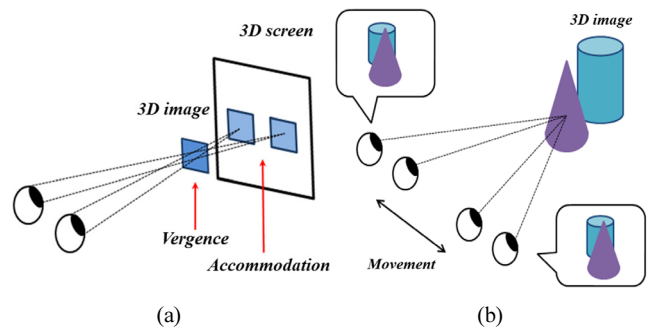


FIG. 1. Problems of conventional 3D displays: (a) accommodation vergence conflict, and (b) imperfection of motion parallax. (the source of the : Y. Takaki, "Super multi-view display and holographic display," in *Proc. LEOS Annual Meeting* (Belek-Antalya, Turkey, Oct. 2009), pp. 12.)

리적 깊이 인지 요인을 관측자에게 제공하므로 시각 피로 없이 매우 자연스러운 3차원 입체 영상을 감상할 수 있다.^[10]

한편, 인간의 동공의 크기는 남녀노소 및 주변 환경에 따라 차이가 있는데, 주변이 밝을 때 최소 2 mm로 축소되었다가, 주변이 어두울 때는 최대 8 mm로 확장된다. 평균적인 동공의 크기는 5 mm로 알려져 있다. 따라서 동공에 최소 2개 이상의 시점을 투영하기 위해서는 시점 간격이 5 mm 이하여야 한다.^[11, 12]

생리적인 깊이 인지 요인을 관찰자에게 모두 제공할 수 있어 실제와 같은 자연스러운 3차원 디스플레이로 각광받고 있는 초다시점 디스플레이가 바로 미래의 궁극적인 평판 3차원 디스플레이가 될 것이다. 그러나 초다시점 디스플레이는 수평시차만을 제공하며, 수직시차를 제공하지 못하는 단점이 존재한다.^[13, 14] 이러한 한계점을 극복하기 위하여 본 논문에서는 수평방향과 수직방향으로 배열된 정방형 모양의 핀홀어레이를 사용하여, 수평시차뿐만 아니라 수직시차도 가지는 완전시차(full parallax) 초다시점 디스플레이를 제안하였다.

2.2. 핀홀어레이를 사용한 초다시점 디스플레이 시스템

본 논문에서 제안된 핀홀어레이를 사용한 초다시점 디스플레이는 시점 이미지를 화면에 나타내는 디스플레이 장치, 완전시차를 주기 위하여 수평방향 및 수직방향으로 배열된 정방형의 핀홀어레이, 시점 영상들을 동공에 동시에 투영시키기 위한 이미징 렌즈로 구성되어 있다. 그림 2는 핀홀어레이를 사용한 초다시점 디스플레이 시스템의 원리를 보여준다.

그림 2에 도시된 바와 같이, 각 해당 핀홀어레이를 통과할 각각의 시점 영상들을 디스플레이 화면에 나타낸다. 이 후, 각 시점 영상의 빛들은 해당하는 핀홀을 통해서만 진행된다. 즉, 시점 A는 핀홀 A에, 시점 B는 핀홀 B, 시점 C는 핀홀 C, 그리고 시점 D는 핀홀 D를 통해서만 빛들이 진행된다. 각 핀홀어레이를 통과하여 뻗어나가는 두 개 이상의 시점 영상 빛들은 단안의 동공에 동시에 투영되도록 이미징 렌즈(imaging lens)를 통과한다. 본 논문에서는 이미징 렌즈로 볼록렌즈(convex lens)를 사용한다. 이미징 렌즈를 통과한 빛들

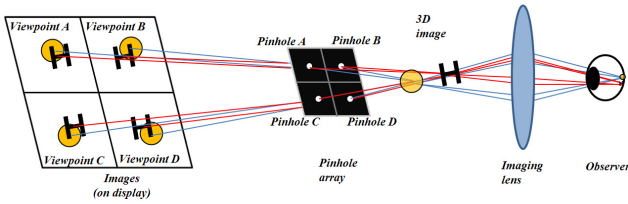


FIG. 2. Principle of Super multi-view display method using pinhole array.

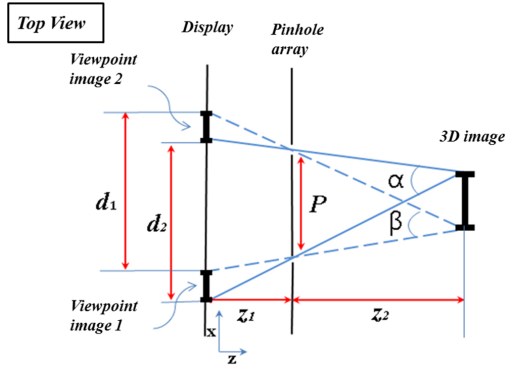


FIG. 3. Principle to create depth image (Top View).

이 사람의 동공에 동시에 투영되면, 이 정보들은 사람의 수정체의 조절에 의하여 망막 상에 초점이 제대로 맺히게 된다.

시점 영상들이 뿌러지는 화면에는 시점 영상들의 배치를 자유자재로 할 수 있는데, 각 시점 영상들의 디스플레이 화면상 위치에 따라서 각 영상들의 동일한 정보가 겹치는 위치에 깊이 이미지(depth image)가 생성된다. 그림 3에 깊이 이미지가 생성되는 원리를 x-z 평면상으로 나타내었다. 이때, x 방향은 시점 이미지의 수평방향, y방향은 시점 이미지의 수직방향, 그리고 z방향은 깊이 방향이다. 디스플레이 화면상에서 각 시점 영상의 동일한 정보를 가지는 픽셀 사이의 거리를 각각 d_1 과 d_2 로 나타내었으며, 핀홀 사이의 거리를 P , 시점 영상이 뿌러지는 디스플레이 화면과 핀홀어레이 사이의 거리를 z_1 , 생성된 깊이 이미지와 핀홀어레이 사이의 거리를 z_2 라고 정의하였다. 각 시점 영상에서 동일한 정보를 가진 빛들이 각각의 핀홀어레이를 통과한 후 모인 빛 사이의 각을 각각 $\angle\alpha$ 와 $\angle\beta$ 라 하였다. 생성된 깊이 이미지의 깊이가 관찰자 쪽으로 가까워지면 즉, 핀홀어레이에서 멀어지면 $\angle\alpha$ 와 $\angle\beta$ 는 작아지고, 깊이 이미지 깊이가 관찰자 쪽에서 멀어지면 즉, 핀홀어레이 쪽으로 가까워지면 $\angle\alpha$ 와 $\angle\beta$ 는 커진다. 시점 영상이 뿌러지는 디스플레이 화면상에서 동일한 물체에 대한 각 시점 영상의 크기는 동일하므로, d_1 과 d_2 는 각 시점 영상들을 임의로 움직인다 하더라도 같다고 볼 수 있다. 이를 대표하여 d 라고 나타낸다면, 이 때, 깊이 이미지가 생성되는 원리를 삼각형의 비례에 의하여 다음 식과 같이 표현 할 수 있다.

$$z_2 : (z_1 + z_2) = P : d \quad (1)$$

이를 z_2 에 대하여 풀면,

$$z_2 = \frac{P}{d-P} z_1 \quad (2)$$

로 나타낼 수 있다. 이를 해석해 보면, 생성된 깊이 이미지의 깊이(z_2)는 핀홀 사이의 거리(P), 각 시점 영상에서 동일한 정보를 가지는 빛 사이의 거리(d), 마지막으로 시점 영상과 핀홀어레이 사이의 거리(z_1)와 관련이 있음을 알 수 있다. 3D 이미지의 깊이는 위 세 가지의 파라미터들을 적절히 조절함으로써 얻을 수 있으며, 최적의 파라미터를 선택하여야만 한다. 이와 관련된 파라미터는 III장에서 분석하였다.

제안된 시스템은 하나의 동공에 투사되기 위한 광학 시스템이다. 따라서, 한 명의 관찰자가 양안에 사용하기 위해서는 관찰자의 다른 쪽 눈에도 동일한 광학계를 사용하여야 한다. 이 때, 양안에 적합한 영상이 들어갈 수 있도록 양안의 광학 시스템에서 사용되는 영상을 개별적으로 컨트롤 할 수 있어야 함은 물론이다.

일반적인 초다시점 디스플레이는 관찰자가 좌우로 움직이며 바라볼 때에 서로 다른 시점 영상을 연속으로 볼 수 있도록 한 구조이다. 하지만, 본 논문에서 제안하는 시스템은 관찰자의 움직임에 따라 서로 다른 시점 영상을 보는 개념이 아니라, 관찰자는 그대로 있는 상황에서 관찰자의 한 동공에 두 개 이상의 시점 영상이 동시에 투사되는 구조이므로 이러한 측면에서 본다면 초다시점 디스플레이로 분류할 수 있다.

한편, 제안된 시스템에서 사용하고 있는 핀홀어레이는 집적 영상의 micro lens array와 배열된 구조면에서는 동일하다 볼 수 있지만, 집적 영상에서는 micro lens array로 획득한 elemental image를 사용하는 것과 달리 본 논문에서 제안하는 시스템은 그림 3과 식 (2)에 제시된 관계에 의하여 배치된 시점 영상을 이용하는 것에 분명한 차이가 있다. 또한, 핀홀어레이로부터 두 개 이상 시점 영상들을 관찰자의 한 동공에 동시 투사하여 초다시점 디스플레이가 가능하게 하도록 이미징 렌즈로 제어한다는 점에서 집적 영상과는 그 목적의 차이가 있다.

III. 실험 및 결과

3.1. 핀홀어레이를 사용한 초다시점 디스플레이 시뮬레이션 시스템

핀홀어레이를 사용한 초다시점 디스플레이 시스템의 원리를 증명하는 시뮬레이션 설계는 그림 4와 같다. 그림 4(a)는 시뮬레이션 시스템의 전반적인 설계 모습이며, 빨간 동그라미에 나타낸 바와 같이 수정체(crystalline lens)와 망막(retina)으로 구성된 사람의 눈 시스템을 재현하였다. 그림 4(b)는 시뮬레이션 시스템을 x-y평면으로 바라보았을 때의 모습이며 정사각형 모양의 판에 (0,0,0)점을 중심으로 하여, 정방형 형태로 가로 2개, 세로 2개의 핀홀을 배열하였다. 각 핀홀어레이

이를 통과할 시점 이미지들은 점광원으로 만들어졌다. x-y 평면을 기준으로 z축의 음의 방향으로 각 핀홀어레이에 매칭되는 시점 이미지들을 x-y 평면에 평행한 면상에 위치시켰으며, 이때, 시점 이미지들과 핀홀어레이 사이의 거리는 그림 4(c)에 표시된 z_1 이다. 제안된 실제의 시스템에서는 시점 이미지를 포함하고 x-y 평면에 평행한 면이 바로 시점 이미지들이 뿌려지는 디스플레이 화면에 해당된다.

시점 이미지들은 동일 z 평면상에 있지만 그들의 x, y방향은 자유자재로 움직일 수 있다. 시점 이미지들의 x, y방향 변화에 따라, 시점 이미지들 간의 간격 d_1, d_2 이 변하고, 이에 따른 3D 이미지의 깊이 변화를 시뮬레이션 상에서 확인할 수 있다.

각각의 시점 이미지의 빛들은 해당하는 핀홀을 통하여 진행하여야 하므로, x-y 평면을 기준으로 1사분면, 2사분면, 3

사분면 및 4사분면에 위치하는 시점 이미지들은 핀홀어레이면의 1사분면, 2사분면, 3사분면 및 4사분면에 위치하는 핀홀과 각각 매칭되어야 한다. 시뮬레이션에서는 x-y 평면의 각 사분면들을 구분할 수 있는 면을 설치함으로써, 서로 다른 사분면에 위치하는 시점이미지와 핀홀이 매칭되는 것을 막는다. 제안된 시스템이 실제로 구현될 때에도 이와 비슷하게 각 시점 이미지가 각 시점이미지에 해당하는 핀홀에만 매칭되도록 특수한 장치의 설치가 필요하다. 각 시점 이미지들의 광선이 상응하는 각 핀홀을 통과한 후 3D 깊이 이미지가 생성되고, 이후에 광선은 빛의 직진성에 의하여 점차 퍼져나가므로 퍼져나가는 빛들을 가이딩하는 역할을 하는 이미징 렌즈를 사용함으로써, 동공에 2개 이상의 시점 영상 투사가 비로소 가능해진다.

시점 이미지로부터의 광선이 이미징 렌즈를 통과한 이후에, 시뮬레이션에서 수정체 렌즈에 2개 이상의 시점 이미지들이 동시에 투영되는지 여부를 확인하고, 수정체 렌즈의 초점 조절로 망막에 상응하는 수신기의 빛 분포들을 확인함으로써, 본 논문에서 제안하는 디스플레이 방식이 단안의 초점 조절에 의한 깊이 인지 요인을 제공하게 되는지 가능할 수 있다. 그림 4(c)에서 z_3 는 핀홀어레이에서 이미징 렌즈 사이의 거리를, z_5 은 이미징 렌즈와 수정체 렌즈 사이의 거리를, z_6 는 수정체 렌즈와 망막 사이의 거리를 나타낸다.

3.2. 핀홀어레이를 사용한 초다시점 디스플레이 시스템의 파라미터 분석

본 논문에서 제안하는 초다시점 디스플레이 방식에서 각 시점 영상들로부터 생성되는 3D 이미지의 깊이는 식 (2)에 의해서 P, d, z_1 에 따라 변하게 되므로, 위 세 가지의 변화에 따른 3D 이미지의 깊이 변화를 분석하였다.

먼저, 핀홀어레이와 시점 이미지 간의 거리 z_1 에 따른 3D 이미지 깊이 z_2 의 변화를 알아보기 위하여, 두 시점 간의 거리 d 를 24 mm로 고정하고, 핀홀 사이의 거리 P 를 10 mm, 15 mm, 20 mm인 경우에 대하여, z_1 을 최소 5 mm에서 최대 28 mm까지 변화시켜 보았다. 그림 5(a)의 분석결과가 나타내는 바와 같이, 3D 이미지 깊이 z_2 는 z_1 의 변화에 비례함을 알 수 있다.

다음으로, 시점 이미지 간의 간격 d 에 따른 3D 이미지 깊이의 변화를 확인하기 위하여, 핀홀어레이와 시점 이미지 간의 거리 z_1 을 15 mm로 고정하고, 핀홀 사이의 간격 P 를 10 mm, 15 mm, 20 mm인 경우에 대하여, d 를 최소 12 mm에서 최대 28 mm까지 변화시켜 보았다. 이 때, 시점 이미지 간 간격이 핀홀 간격보다 작아지는 경우를 제외하고 그림 5(b)와 같이 도식화 하였다. 이 결과로부터, d 에 따른 3D 이미지 깊이 z_2 의 변화는 반비례함을 알 수 있다. 하지만, 3D 깊이 이미지가 만들어지는 위치는 무한정 크거나 무한정 작을 수 없으며, 일정한 한계를 가지고 있다.

마지막으로, 핀홀의 간격 P 의 변화에 따른 3D 이미지 깊

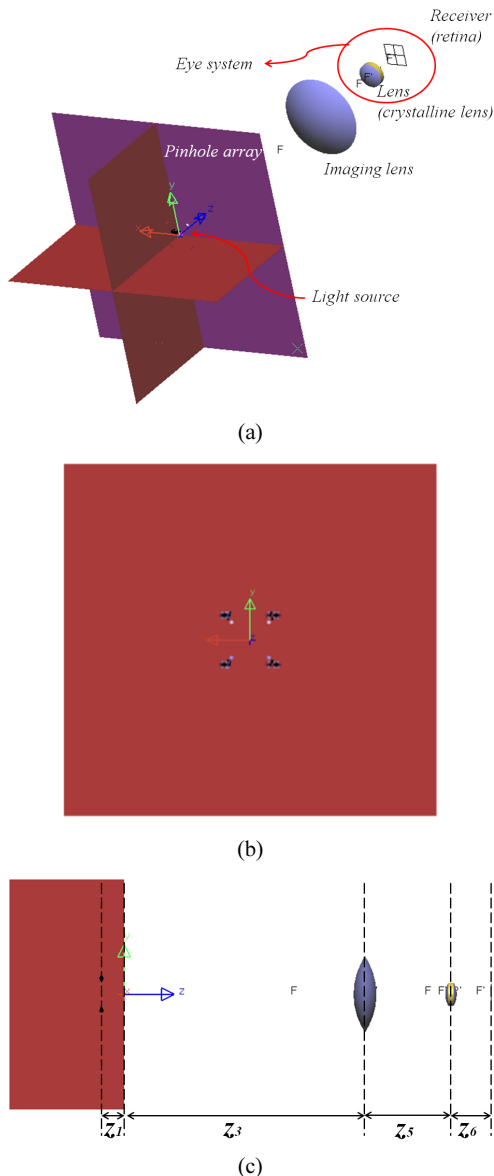


FIG. 4. Simulation system of super multi-view display using pinhole array: (a) total view (b) x-y plane view (c) y-z plane view.

이 z_2 의 변화를 확인하였다. 시점 이미지와 핀홀어레이 사이의 간격 z_1 을 15 mm로 고정하고, 시점 이미지 사이의 간격 d 는 18 mm, 24 mm, 30 mm인 경우에 대하여, P 를 8 mm ~ 22 mm로 변화함에 따라 3D 이미지 깊이가 어떻게 변하는지 살펴보았다. 그림 5(c)에 도시된 바와 같이, P 의 변화에 따라 3D 이미지의 깊이 z_2 는 급속히 증가함을 알 수 있다.

그림 6은 제안된 시스템의 Top view로, x-z 평면상에서 총 50,000개의 광선을 이용하여 시뮬레이션 하였을 때 광선 추적 분포를 나타낸다. 본 논문에서 제안하는 디스플레이가 초다시점 디스플레이 조건을 만족하기 위하여 그림 6과 같이 이미징 렌즈를 통한 영상들이 수정체 렌즈에 동시에 투영되도록 하여야 한다. 이 때, 2x2 핀홀어레이 상이 수정체에 맺히도록 이미징 렌즈의 초점거리가 조절되어야 한다. 그림 7은 이미징 렌즈를 통과한 시점 이미지를 수정체 렌즈에 가이딩하기 위한 관련 파라미터들을 표시하였다. 여기서 P 는 핀

홀 사이의 거리를, z_2 는 핀홀어레이에서 3D 깊이 이미지까지의 거리를, z_3 는 핀홀어레이로부터 이미징 렌즈까지의 거리를 의미하며, 이미징 렌즈의 직경을 d_3 로 나타내었다. 이 때, 각 파라미터들의 상관관계는 식 (3)과 같으며, 실제로 각 시점 영상들이 이미징 렌즈를 통과할 때의 간격은 아래 식에서 주어지는 d_3 의 간격보다 작아야 시점 이미지들을 동공에 제대로 가이딩할 수 있다.

$$z_2 : z_3 - z_2 = P : d_3 \quad (3)$$

$$d_3 = \frac{z_3 - z_2}{z_2} P \quad (4)$$

그림 8은 한 시점 영상에 해당하는 광선이 수정체 렌즈에 맺히는지 확인할 수 있는 파라미터들을 나타내었다. 한 시점 영상에 해당하는 점광원의 광선이 핀홀어레이를 통과해 초점거리가 f 인 이미징 렌즈로 광선이 평행하게 진행되는 경우, 이 광선은 이미징 렌즈의 초점으로 굴절된다. 굴절된 광선이 수정체 렌즈와 만나는 위치에서 수정체 렌즈의 중심까지의 거리를 l_1 이라고 하면 식 (5)와 같은 관계를 얻을 수 있다. 또한, 한 시점 영상에 해당하는 점광원의 광선이 핀홀어레이를 통과해 이미징 렌즈의 초점 f 를 지나는 경우, 이 광선은 이미징 렌즈를 통과후 평행한 방향으로 진행한다. 이러

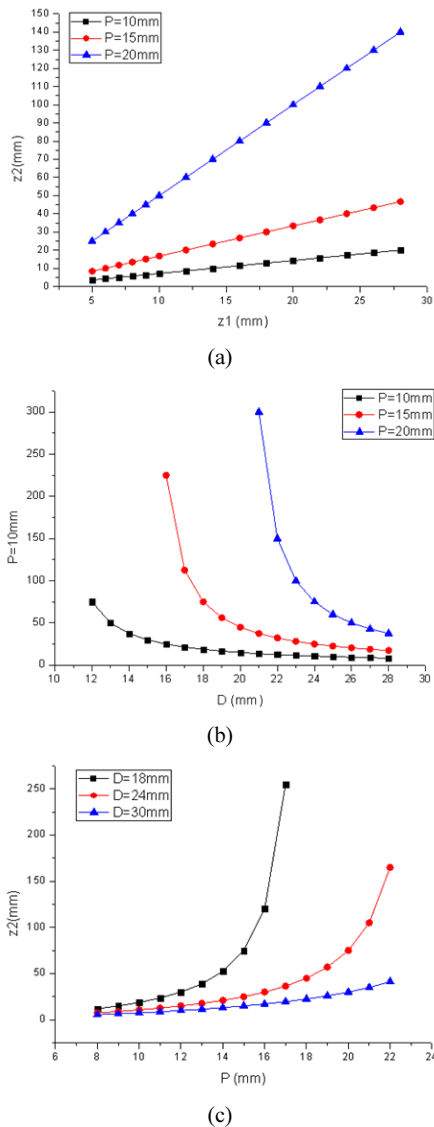


FIG. 5. Changes in depth of 3D image according to (a) z_1 , (b) d , (c) P .

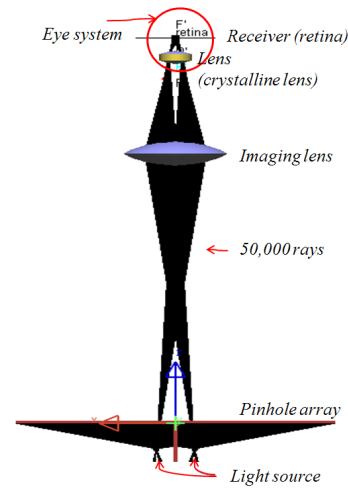


FIG. 6. Image guiding to crystalline lens through imaging lens.

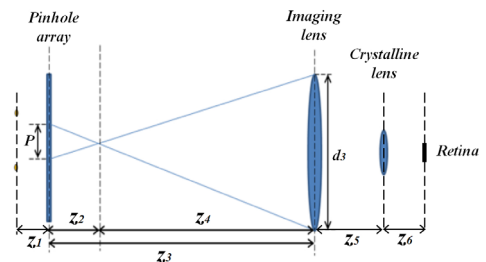


FIG. 7. Parameters related with image guiding.

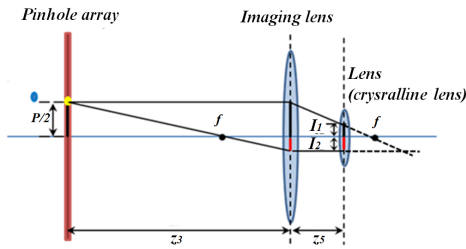


FIG. 8. Parameters related with ray propagation through imaging lens.

TABLE. 1. Fixed parameters of simulation system

Parameter	Value	Notes
z_1	10 mm	Distance from point light source to pinhole array
P	10 mm	Interval of pinholes
z_3	100 mm	Distance from pinhole array to imaging lens
z_5	20 mm	Distance from imaging lens to crystalline lens
z_6	20 mm	Distance from crystalline lens to retina (receiver)
f_1	24.915 mm	Focal length of imaging lens

한 평행한 방향으로 진행하는 광선이 수정체 렌즈와 만나는 위치에서 수정체 렌즈의 중심까지의 거리를 I_2 라고 하면 식 (6)을 도출할 수 있다.

$$I_1 = \frac{f - z_5}{2 \cdot f} P \tag{5}$$

$$I_2 = \frac{P \cdot f}{2 \cdot (z_3 - f)} \tag{6}$$

위 식에서 도출한 I_1 과 I_2 모두 평균적인 동공크기 절반인 2.5 mm 이내의 길이어야 하나의 시점 영상이 동공에 투사될 수 있다. 마찬가지로 다른 시점 영상의 광선도 위 조건을 만족한다면, 2개 이상의 시점 영상이 동공에 동시 투사됨을 확인할 수 있다. 수정체 렌즈를 통과한 광선은 이후 굴절하여 망막에 상응하는 수신기쪽으로 진행하나, 식 (5)와 식 (6)의 이해를 돕기 위하여 수정체 렌즈가 없는 상황에서 진행하는 광선은 점선으로 나타내었다.

3.3. 초점조절 거리 측정 결과 및 분석

3.3.1. 초점조절 거리 측정 과정

본 논문에서 제안하는 초다시점 디스플레이의 단안에 의한 초점 조절을 확인하기 위하여, 점광원을 사용하였으며 핀홀 간격, 점광원과 핀홀어레이 사이의 거리, 이미징 렌즈의 위치와 초점거리 및 수정체 렌즈의 위치는 표 1과 같이 고정하였으며, 시점 이미지 간의 간격 P 만을 조절하여 3D 깊이 이미지를 생성하였다. 제안된 시스템에서는 이미징 렌즈를 사

용하기 때문에, 이로 인하여 수정체가 초점을 맺는 거리가 3D 깊이면과 상이해진다. 따라서, 이를 고려하여 이미징 렌즈를 통해 생성된 3D 이미지를 볼 때의 상이 맺히는 깊이면을 기준으로 수정체 렌즈의 초점 거리를 해당 깊이면과, 3D 이미지 깊이면보다 먼 곳에, 그리고 3D 이미지 깊이면보다 가까운 곳에 두도록 순차적으로 변화시킴으로써, 망막에 상응하는 수신기상의 빛의 조도(irradiance)를 확인하였다. 또한, 망막에 맺히는 상의 블러 정도를 수치적으로 확인하기 위하여 FWHM(Full width at half maximum)로 수치정보를 얻었다.

3.3.2. 초점조절 거리 측정 결과 및 분석

시뮬레이션을 통하여 관찰자가 제안된 방법의 디스플레이에서 생성된 3D 이미지를 관찰할 시, 이미징 렌즈를 통해 생성된 3D 이미지를 볼 때의 상이 맺히는 깊이면에 정확히 초점을 맺는지 확인하기 위하여 망막상의 빛 분포를 통해 초점 조절 거리를 측정하였다.

우선 시점 이미지의 간격을 12.5 mm, 12.22 mm, 12 mm로 조절하여 깊이가 40 mm, 45 mm, 50 mm인 3D 이미지를 생성하였을 때, 이미징 렌즈를 통해 각 생성된 3D 이미지를 볼 때의 상이 맺히는 깊이 면을 각각 a_{40} , a_{45} , a_{50} 라 하였다.

시뮬레이션에서, 40 mm 깊이의 3D 이미지를 생성한 후, 수정체 렌즈의 곡률 반경을 조절함으로써, 수정체 렌즈가 a_{40} , a_{45} , a_{50} 에 맺도록 하였다. 다음으로는 45 mm, 50 mm 깊이의 3D 이미지를 각각 생성하였으며, 수정체 렌즈의 초점이 a_{40} , a_{45} , a_{50} 에 맺도록 하여 망막 수신기에 맺힌 점광원의 복사조도를 확인하였다. 각 경우의 복사조도 결과를 그림 9, 10, 11에 나타내었다.

3D 이미지의 깊이가 40 mm일 때에는, 수정체 렌즈가 이미징 렌즈를 통해 깊이가 40 mm인 3D 이미지를 볼 때의 상이 맺히는 깊이 면 a_{40} 에 초점을 맺을 때에 가장 블러 없는 영상을 확인할 수 있었으며, 이 때의 반치폭은 0.62943 mm이다. 수정체 렌즈가 a_{45} 과 a_{50} 에 초점을 맺는 경우의 반치폭은 각각 0.88598, 1.00484로 수정체 렌즈가 a_{40} 에 초점을 맺을 때보다 컸으며, 망막상 수신기에는 주변에 퍼져나가는 빛들도 함께 관측되어 선명한 상을 얻지 못하였다.

3D 이미지의 깊이가 45 mm일 때에는, 수정체 렌즈가 a_{40} , a_{45} , a_{50} 에 초점을 맺을 때에 각각 0.89042, 0.70604, 1.07881의 반치폭을 가지고, a_{45} 깊이면에 초점을 맺을 때에 가장 빛의 퍼짐이 없는 상을 얻을 수 있었다.

3D 이미지의 깊이가 50 mm인 경우에는, 수정체 렌즈가 a_{40} , a_{45} , a_{50} 에 초점을 맺을 때에 각각 0.94054, 0.82059, 0.69197의 반치폭을 가지며, a_{50} 깊이면에 초점을 맺을 때에 가장 빛의 퍼짐이 없는 상을 얻을 수 있었다.

시뮬레이션한 결과들로부터, 초다시점 디스플레이의 조건에 부합하도록 단안에 2개 이상의 시점을 투영함으로써, 생성된 3D 이미지의 깊이면에 정확히 초점을 맺을 수 있다는 것을 확인하였다. 또한, 수평 및 수직으로 배열한 핀홀어레이

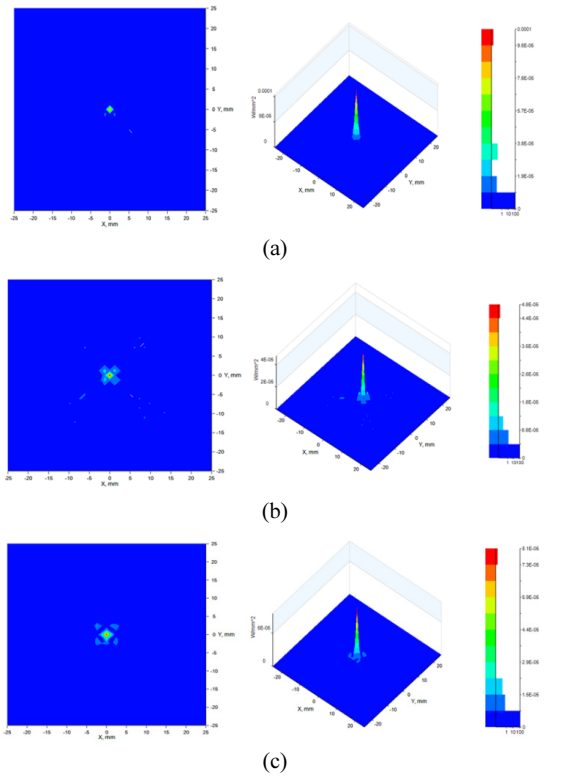


FIG. 9. Irradiance of point light source on retina when depth of 3D image is 40 mm and crystalline lens focus on (a) $z=a_{40}$ (b) $z=a_{45}$ (c) $z=a_{50}$.

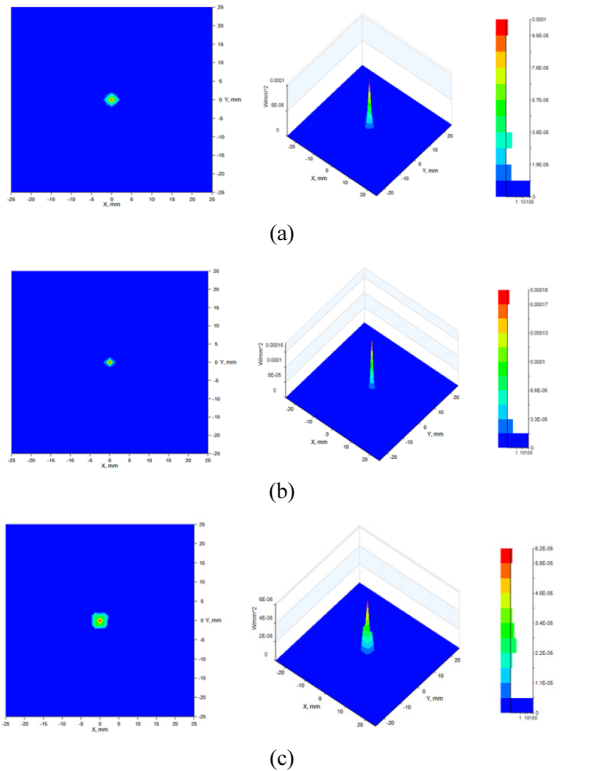


FIG. 10. Irradiance of point light source on retina when depth of 3D image is 45 mm and crystalline lens focus on (a) $z=a_{40}$ (b) $z=a_{45}$ (c) $z=a_{50}$.

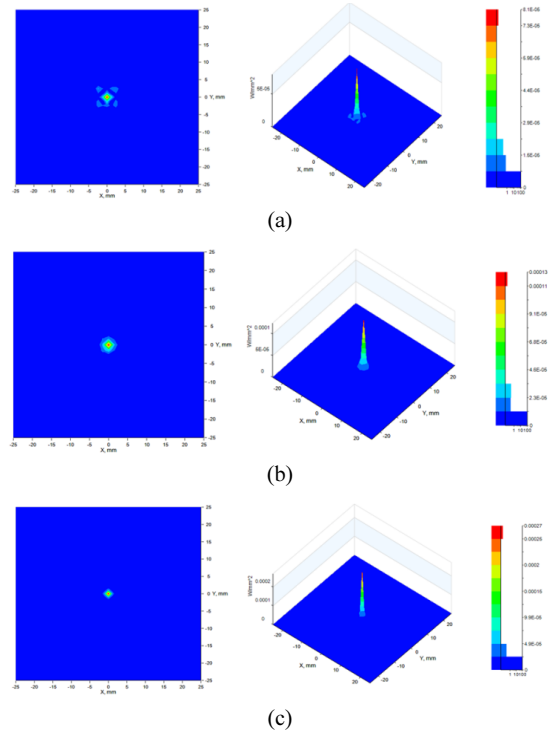


FIG. 11. Irradiance of point light source on retina when depth of 3D image is 50 mm and crystalline lens focus on (a) $z=a_{40}$ (b) $z=a_{45}$ (c) $z=a_{50}$.

TABLE. 2. FWHM value on retina when depth of 3D image is 40 mm

case	depth	FWHM
a	40 mm	0.62943
b	45 mm	0.88598
c	50 mm	1.00484

TABLE. 3. FWHM value on retina when depth of 3D image is 45 mm

case	depth	FWHM
a	40 mm	0.89042
b	45 mm	0.70604
c	50 mm	1.07881

TABLE. 4. FWHM value on retina when depth of 3D image is 50 mm

case	depth	FWHM
a	40 mm	0.94054
b	45 mm	0.82059
c	50 mm	0.69197

이로 인하여 수평 및 수직 시차를 가지므로 완전시차를 가지는 초다시점 디스플레이가 가능하다.

IV. 결 론

본 논문에서는 양안시차 기반의 3차원 디스플레이가 가지는 초점 조절과 수렴의 불일치를 해결하고, 수평시차만을 가지는 기존의 초다시점 디스플레이에 수직으로 배열된 핀홀 어레이를 사용함으로써 추가적으로 수직시차를 부여함으로써, 완전시차를 가지는 새로운 초다시점 디스플레이 방법을 제안하였다.

이에 따라, 제안된 시스템이 최소 2개 이상의 시점이 한 동공에 동시에 투사되어야 하는 초다시점 디스플레이의 조건을 만족하기 위한 이미징렌즈와 관련된 파라미터 및 각 핀홀을 통과한 시점 영상들로부터 생성되는 3D 이미지의 깊이와 이와 관련된 파라미터들 즉, 핀홀어레이와 시점 이미지 간의 거리, 시점 이미지 간의 간격, 그리고 핀홀의 간격과의 상관관계를 분석하였다.

또한, 분석된 파라미터 값을 적용한 시뮬레이션의 각 생성된 3D 깊이 이미지를 바라보는 수정체의 초점 거리변화에 따른 망막 수신기상 빛의 복사조도로부터, 수정체의 초점이 이미징 렌즈를 통해 생성된 3D 이미지를 볼 때의 상이 맺히는 깊이면에 맺는 경우에 가장 불려가 없는 영상을 볼 수 있음을 가장 낮은 수치의 FWHM결과로 확인하였다. 이로써, 시뮬레이션 결과에서 주시각과 초점이 같이 일치하므로, 본 논문에서 제안하는 시스템은 수렴과 조절의 불일치를 해소하는 초다시점 디스플레이가 됨이 증명된다.

시뮬레이션에서 수직으로 배열된 핀홀어레이를 통과한 서로 다른 시점 영상의 빛이 한 동공에 동시에 투사됨을 확인함으로써, 수직시차를 가지는 초다시점 디스플레이 방법이 가능함을 확인하였다.

본 논문에서 제안한 방법은 시점 영상을 동공에 투영하기 위한 이미징 렌즈를 사용하기 때문에, 이미징 렌즈의 두께가 무한히 두껍게 될 수 없으므로, 비교적 근거리의 3차원 입체 영상을 관찰하기에 적합하다. 여기서 근거리 영상이라 함은 본 시스템의 구조상 시점 영상에서부터 관찰자의 동공까지의 총 거리가 비교적 일반적인 3차원 디스플레이보다는 짧은 것을 의미하는 것으로, 일반적인 이미징 렌즈를 사용하면 전체적인 시스템의 크기는 대략 10 cm ~ 20 cm 정도가 될 것으로 보인다. 한편, 한 사람의 동공에 정확히 두 개 이상의 시점을 투영하기 위해서는 본 시뮬레이션과 관찰자의 동공의 위치가 동일한 축 상에 위치하여야 한다. 또한, 제안된 시스템에서 사용되는 이미징렌즈 및 핀홀의 위치, 시점 영상의 위치 관계가 가장 중요한 정렬 요소이며, 이에 따라 정밀한 정렬이 필요하다.

제안된 시스템에서 이미징 렌즈를 사용함에 따라, 한 동공에 입사되는 시점의 수뿐만 아니라, 시점 영상의 위치 변화에 따라서 구면 수차로 인하여 상이 뺄어지거나 흐려지는 현상이 발생할 수도 있다. 하지만 이는 이미징 렌즈로 비구면 렌즈를 사용하거나, 시점 영상을 뿌려주는 화면에서 영상 처리 작업을 수행하는 등의 방법으로 해결 가능할 것으로 보인다. 덧붙여, 본 논문의 목적은 아니지만, 시점의 개수가 n

개로 증가함에 따라 $\frac{1}{n^2}$ 로 해상도가 감소하는 문제는 추후 해결하여야 할 과제이다. 앞으로 이미징 렌즈의 두께 문제와 핀홀을 사용함으로써 인하여 3D 이미지의 전체적인 밝기가 어두워지는 한계와 해상도 저하를 극복하는 기술 개발이 이루어진다면 HUD(Head Up Display) 또는 HMD(Head Mounted Display) 시스템에 적용이 가능할 것으로 보인다.

감사의 글

이 논문은 미래창조과학부가 지원한 2013년 정보통신·방송(ICT) 연구개발사업과 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다 (No. 2013-067321).

References

1. B. Bhushan, "Biomimetics: lessons from nature-an overview," *Phil. Trans. R. Soc. A* **367**, 1445-1486 (2009).
2. J.-H. Park, "Three-dimensional display," *Optical Science and Technology* **13**, 22-27 (2009).
3. T. Motoki, H. Isono, and I. Yuyama, "Present status of three-dimensional television research," *Proc. IEEE* **83**, 1009-1021 (1995).
4. H.-J. Choi, "Current status of 3D TV technologies," *Physics & High Technology* **19**, 20-23 (2010).
5. T. Shibata, "Head mounted display," *Displays* **23**, 57-64 (2002).
6. D. Park, K. Kim, C. Lee, J. Son, and Y. Lee, "Lenticular stereoscopic imaging and displaying techniques with no special glasses," *Image Processing* **3**, 137-140 (1995).
7. G. Lippmann, "La photographie integrale," *Comptes-Rendus Acad. Sci.* **146**, 446-451 (1908).
8. R. Otsuka, T. Hoshino, and Y. Horry, "Transpost: 360-viewable three-dimensional display system," *Proc. IEEE* **94**, 629-635 (2006).
9. T. Kurihara and Y. Takaki, "Improving viewing region of 4f optical system for holographic displays," *Opt. Express* **19**, 17621-17631 (2011).
10. Y. Takaki, "Super multi-view display and holographic display," in *Proc. LEOS Annual Meeting* (Belek-Antalya, Turkey, Oct. 2009), pp. 12-13.
11. L. Frank, S. J. Pedrotti, L. M. Pedrotti, and L. S. Pedrotti, *Introduction to Optics*, 3rd ed. (Pearson Education, Inc., 2007), pp. 419-421.
12. J.-M. Choi, H.-M. Son, and Y.-J. Lee, "Biomimetic variable-focus lens system controlled by winding-type SMA actuator," *Opt. Express* **17**, 8152-8164 (2009).
13. Y. Urano, S. Kashiwada, H. Ando, K. Nakamura, and Y. Takaki, "Super-multiview windshield display for driving assistance," *Journal of Information Display* **12**, 43-46 (2011).
14. Y. Takaki, K. Tanaka, and J. Nakamura, "Super multi-view display with a lower resolution flat-panel display," *Opt. Express* **19**, 4129-4139 (2011).