

포토폴리머 기반의 다시점 VHOE 광학판 구현을 위한 최적 노출시간 스케줄링 기법

정희원 김승철*, 구정식*, 김은수*

Optimized Exposure-time Scheduling Scheme for Implementation of the Photopolymer-based Multiview VHOE

Seung Chul Kim*, Jung Sik Koo*, Eun-Soo Kim* *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 최적화된 노출시간 스케줄을 이용한 포토폴리머(HRF-150-100)기반의 VHOE 광학판 구현기법을 제시하고 실험을 통해 8시점의 VHOE 광학판을 구현하였다. 즉, VHOE를 구현하기 위한 포토폴리머의 노출 에너지와 누적 격자강도 간의 관계를 나타내는 4차 다항식의 수학적 모델을 제시하고 이를 이용하여 다시점의 회절격자를 포토폴리머에 효과적으로 기록하기 위한 최적화된 노출시간 스케줄을 유도하였다. 또한, 제시된 노출시간 스케줄에 따라 8시점의 회절격자를 포토폴리머에 기록함으로써 최적화된 8시점 VHOE 광학판을 구현하고 그 특성을 분석하였다.

ABSTRACT

In this paper, a new method to implement the photopolymer-based VHOE using the optimized exposure time schedule is proposed and using this method, the 8-view VHOE system is experimentally developed. The cumulative grating strength dependence on the exposure energy is mathematically modeled by using the fourth-order polynomial function and then using this model, the optimized exposure-time schedule of the photopolymer for recording the given multiple gratings is calculated. In addition, basing on this suggested exposure-time schedule, 8-view VHOE optical device is finally implemented and its performance is discussed.

1. 서론

3차원(3D) 영상 디스플레이 기술은 차세대 입체 멀티미디어 정보통신의 핵심 기반기술로서 선진국을 중심으로 하여 경쟁적으로 그 개발을 추진하고 있다. 그 동안, 3차원 영상 디스플레이 기술은 ITU (International Telecommunication Union)의 전신인 CCIR(International Radio Consultative Committee) 연구그룹의 권고안에 따라 무안경식이고 눈에 피로를 주지 않아야 하며, 현재의 평면시스템 보다 해상도가 높아야 될 뿐만 아니라 현 평면영상 시스템과

의 호환성 및 다시점이 가능해야 한다는 것 등이 가장 중요한 핵심 기술^{[1][2][3]}로 대두되고 있으며 현재 이를 구현하기 위한 다양한 방법들에 대한 연구가 진행되고 있다.

최근에는 자연스러운 3D 영상 디스플레이 구현을 위한 새로운 접근방법으로 VHOE(volume holographic optical element) 광학판을 이용한 다시점 스테레오 3D 디스플레이 시스템의 구현 모델이 제시되었다.^{[4][5]} VHOE 광학판을 이용한 다시점 3D 디스플레이 시스템은 시점 개수만큼의 회절격자를 광굴절매질에 각 다중화 방식으로 기록하여 VHOE 광

* 광운대학교 전자공학과 국가지정 3차원 영상미디어 연구실(eskim@daisy.kwangwoon.ac.kr)

논문번호: 020042-0129, 접수일자: 2002년 1월 29일

※ 본 연구는 과학기술부 국가지정연구실(NRL) 사업의 지원아래 수행되었습니다.

학판을 만든 후, 여기에 임의의 시점 영상들을 시분할적으로 입사시킴으로서 다시점 스테레오 영상을 디스플레이 할 수 있는 기술이다. 따라서, 기록 및 재생되는 시점의 개수는 VHOE 광학판의 물리 광학적 특성에 의해 크게 좌우되게 된다. 최근, 이러한 물리적 한계를 해결하기 위한 새로운 광학판 기록매질로 포토폴리머(photopolymer)에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.^{[6][7][8][9]}

일반적으로, VHOE를 이용한 3D 영상 디스플레이 시스템에서는 VHOE의 광 감도(photosensitivity)에 따른 회절효율 특성, 각 선택도(angular selectivity)에 따른 다시점화 특성, 재생된 회절빔간의 영상 누화(crosstalk) 특성 및 각 시점에 따른 균일한 회절효율 특성 등이 요구된다. 특히, VHOE기반의 다시점 스테레오 입체영상 디스플레이 시스템에서 시점에 따른 복원영상이 누화 없이 균일한 회절빔으로 재생되기 위해서는 다시점의 회절격자를 포토폴리머에 효과적으로 기록하기 위한 최적화된 노출시간 스케줄링이 요구된다^[8].

따라서, 본 논문에서는 VHOE를 이용한 다시점 스테레오 입체영상 디스플레이 시스템에서 포토폴리머 기반의 다시점 VHOE 광학판을 효과적으로 구현하기 위한 포토폴리머(HRF-150-100, Dupont)의 최적화된 노출시간 스케줄링 기법을 제시하고 실험을 통해 8시점의 VHOE 광학판을 구현하고자 한다. 즉, 다시점의 VHOE 광학판을 구현하기 위한 포토폴리머의 노출 에너지와 누적 격자강도 간의 관계를 나타내는 4차 다항식의 수학적 모델을 제시하고 이를 이용하여 다시점의 회절격자를 포토폴리머에 기록하기 위한 최적화된 노출시간 스케줄을 유도하고자 한다^{[10][11]}. 또한, 제시된 노출시간 스케줄에 따라 8시점의 회절격자를 포토폴리머에 기록하여 최적화된 8시점 VHOE 광학판을 구현함으로써 본 논문에서 제시한 포토폴리머의 노출시간 스케줄링 기법의 VHOE 기반의 다시점 스테레오 입체 영상 디스플레이 시스템에 실질적인 응용 가능성을 제시하고자 한다.

II. VHOE 기반의 다시점 영상 디스플레이

VHOE 광학판을 이용한 다시점 스테레오 입체영상 디스플레이 기술은 Bragg 조건에 의해 높은 각 선택도를 갖는 기존의 체적 홀로그램에 다시점의 회절격자를 생성한 다음 이를 통해 입사된 임의의 시점영상을 회절격자에 의해 정해진 방향으로 회절

되도록 하는 원리를 다시점 3D 디스플레이 시스템에 응용한 기술이다^{[4][5]}. 여기서, 필요한 다시점의 스테레오 영상을 시분할적으로 구현하기 위해서는 시점영상과 일치하는 개수의 회절격자를 효과적으로 저장하고 재생할 수 있는 홀로그램의 고밀도 다중화 기록기술이 요구된다. 특히, 시점 개수만큼의 회절격자를 최적화된 노출시간 스케줄에 따라 포토폴리머에 다중화하여 기록함으로써 다시점의 VHOE 광학판을 구현하고, 여기에 임의의 시점 영상들을 시분할적으로 입사시켰을 때 균일하게 복원되는 회절빔에 의해 다시점의 스테레오 영상을 효과적으로 디스플레이 할 수 있게 된다.

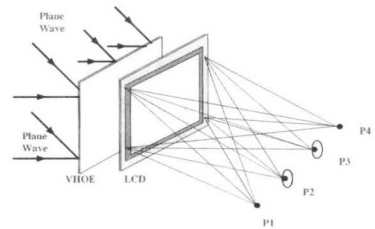


그림 1. VHOE를 이용한 다시점 3D 디스플레이 시스템의 개념도

그림 1은 평면파 형태의 기준빔과 물체빔을 시점수에 따라 각 다중화하여 포토폴리머에 기록하여 다시점의 VHOE 광학판을 제작한 다음, 제작된 VHOE 광학판과 LCD 패널을 조합하여 다시점의 영상을 공간적으로 서로 다른 시점으로 분리 디스플레이 하는 VHOE 기반의 다시점 스테레오 입체 영상 디스플레이 시스템의 기본 개념을 나타낸 것이다. 즉, 그림 1에서 알 수 있듯이 VHOE 광학판에 입사되는 기준빔의 입사 방향을 LCD 패널에 디스플레이 되는 다시점(그림 1에서는 4시점을 나타내고 있음)의 영상과 동기화 시킴으로서 각각의 시점 영역에 다시점의 영상을 시분할적으로 디스플레이 하게 된다.

III. 다시점 VHOE 구현을 위한 사전 노출시간 분석

일반적으로, 대부분의 상용 포토폴리머는 초기 광 노출에는 반응이 둔감하고 노출시간이 경과함에 따라 회절격자 형성이 선형적으로 증가하기 때문에 효과적인 회절격자 기록을 위해서는 포토폴리머의 광학적 특성에 따라 사전 노출시간(pre-exposure)의 적용을 필요로 한다. 즉, 포토폴리머의 분자들을 활

성화시키기 위한 사전 노출시간 스케줄이 요구된다.

그림 2는 회절효율 및 포토폴리머의 여러 물리적 특성을 이용하여 최적의 사전 노출시간과 다시점의 회절격자를 기록하기 위한 최적의 노출시간 스케줄을 유도하기 위한 광학 실험 구성도를 나타낸 것이다. 본 논문에서는 VHOE 기반의 다시점 스테레오 입체영상 디스플레이 시스템에 실질적으로 적용할 8시점의 VHOE 광학판의 제작에서 요구되는 최적의 사전 노출시간을 유도하였다.

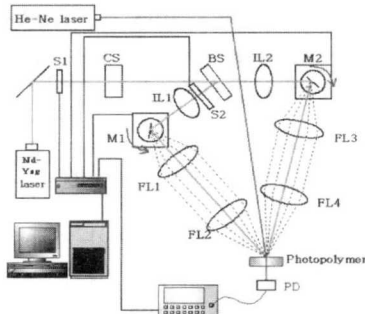


그림 2. 다시점 VHOE 구현을 위한 노출시간 측정 시스템도(S : 셔터, CS : 콜리메이팅 시스템, BS: Beam Splitter, IL : 이미징 렌즈, M : 거울, FL: 퓨리에 렌즈, PD : 광 검출기)

본 논문에서는 포토폴리머에 입사되는 두 간섭빔의 각도는 두 간섭빔 사이각에 따른 회절효율 변화를 측정하여 최적인 27°로 구성하여 실험하였다. 그리고, 실험에 사용된 광원으로는 파장이 532nm인 Nd-YAG 레이저를 사용하였고, 각 빔의 세기는 모두 20*mW/cm*로 동일하게 사용하였다. 또한, 전자셔터를 사용하여 빔을 제어함으로써 기록 시에는 두 빔을 동시에 차단 할 수 있고, 복원 시에는 기록빔만을 차단 할 수 있는 온라인(on-line) 시스템을 설계, 제작하여 구성하였다.

그림 3은 적용한 사전노출 시간에 따른 회절효율 분포를 나타낸다. 사전노출이 없이 기록한 경우에 30초 까지는 반응이 없다가 30초부터 반응을 시작하였다. 이러한 결과를 바탕으로 30초 전후의 값을 사전노출 시간으로 정하여 실험한 결과 30초를 적용하였을 경우 최적의 회절효율을 나타내므로 이러한 실험 결과를 토대로 본 논문에서는 포토폴리머를 이용한 다시점의 VHOE 광학판 구현 시 30초의 사전 노출시간을 적용하였다. 또한, 선형적으로 증가하는 부분을 이용하기 위하여 안정화 시간 (saturation time)을 240초로 결정하였고, 그림 3에서의 원점은 사전노출을 제외한 실질적인 노출시간

을 표현한 것이다.

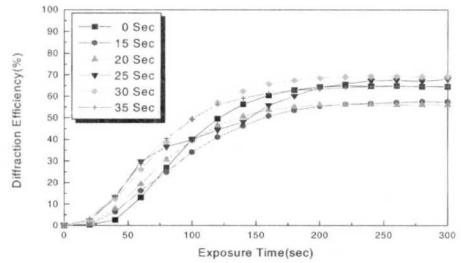


그림 3. 사전 노출시간에 따른 회절효율의 변화

IV. 다시점 VHOE 구현을 위한 노출시간 스케줄의 수학적 모델링

실제로 VHOE를 이용한 다시점 스테레오 입체영상 디스플레이 시스템을 구현하기 위해서는 비교적 큰 직경의 평면과 형태의 회절빔과, 높은 회절효율, 그리고 다시점의 회절격자를 기록하기 위한 높은 각 선택도 등의 특성을 갖는 VHOE 광학판이 요구된다. 따라서, 최적의 다시점 VHOE 광학판 제작을 위해서는 효과적인 사전 노출시간의 적용과 다시점의 회절격자를 기록하기 위한 최적의 노출시간 스케줄링이 매우 중요한 과정이라 할 수 있다. 본 논문에서는 회절격자의 기록 정도를 나타내는 파라미터로 노출 에너지의 함수인 누적 격자강도를 이용하였으며, 누적 격자강도는 회절빔 세기의 제곱근을 취한 후 이를 적분하여 유도할 수 있으며, 누적 격자강도는 포토폴리머에 기록된 총 에너지이므로 그것을 시점 수에 따라 동일하게 분배해 주게 되면 균일한 회절효율을 얻을 수 있게 된다.

그림 4(a)는 동일한 노출시간을 적용하여 각 다중화 방법으로 기록한 8개의 홀로그램에 대한 각각의 회절효율을 나타낸 것이며 각각의 회절격자는 안정화시간인 240초를 홀로그램의 수 8로 나눈 30초를 각각 적용하였다. 본 논문에서는 이러한 사전조건들을 적용한 후 반복적인 실험을 통해 얻은 다시점의 회절효율의 특성을 분석하기 위하여 다음과 같은 수학적인 파라미터를 사용하였다.

$$m = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M E_i' \quad (1)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (E_i' - m)^2 \quad (2)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (E_i' - m)^2} \quad (3)$$

식 (1)과 식 (3)은 일반적인 평균값과 표준편차를 구하는 식으로서 m 은 회절효율의 평균값을, M 은 회절격자의 수를, E_i 는 회절효율을 그리고 σ 는 회절효율의 표준편차를 각각 나타낸다. 그림 5에서 각 회절격자에 대한 회절효율의 평균값과 표준편차를 구할 수는 있지만 평균이나 표준편차 값 하나만으로는 회절효율의 변화분포를 정확하게 파악할 수 없기 때문에 본 논문에서는 새로운 파라미터로 변동계수 (coefficient of variation)를 도입하여 분석하였다. 일반적으로, 두 결과의 회절효율 평균값이 같다면 각각의 표준편차만을 비교함으로써 각 시점에 대한 회절효율의 분포정도를 상대적으로 판단할 수 있지만 두 결과의 평균값이 서로 다르거나 계속 변하는 경우에는 표준편차만을 가지고 두 결과에 대한 상대적인 회절격자 분포정도를 판단하기가 어렵다. 따라서, 서로 다른 평균과 표준편차를 갖는 여러 실험결과의 상대적인 변화 분포를 분석하기 위해서는 각 실험 결과의 평균과 표준편차를 동시에 고려한 변동계수가 필요하게 되며 이는 식(4)와 같이 주어진다

$$v = \left(\frac{\sigma}{m} \right) \times 100\% \quad (4)$$

본 실험에서는 식(4)와 같은 변동계수를 이용하여 복원되는 8개의 영상에 대한 최적의 회절효율 분포를 분석하였다.

표 1. 각 다항식별 어려울

다항식의 차수	최대 어려울
6	0.12%
5	1.09%
4	2.38%
3	5.27%

그리고, 본 논문에서는 다시점의 회절빔에 대한 균일한 회절효율을 효과적으로 얻기 위한 포토폴리머다중화 기록의 접근방법으로 노출시간 스케줄링에 대한 수학적인 모델을 유도하였다. 표 1은 노출시간과 누적 격자강도 사이의 관계를 다항식으로 표현하기 위해서 유도된 다항식과 원 데이터와의 차이를 최대 어려울로 나타낸 것이다. 따라서, 표 1의 결과를 토대로 본 논문에서는 최종적으로 다시점의 VHOE 광학판 구현에 적합한 노출시간 스케줄을 식(5)과 같은 4차 다항식으로 모델링 하였다.

$$A = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 \quad (5)$$

식 (5)는 포토폴리머를 이용한 기존의 체적 홀로그래프 메모리 분야에서 일반적으로 적용되는 6차 다항식을 기본 모델로 하고, 이에 본 논문에서의 최대 어려울을 적용하여 수학적으로 유도된 모델이다.^[11] 여기서, A 와 t 는 누적 격자강도와 누적 노출시간을 각각 나타내며 $a_0 \sim a_4$ 는 누적 격자강도 그래프를 다항식으로 표현할 때 적용된 계수를 나타낸다. 8시점의 VHOE 광학판인 경우는 8개의 회절격자를 기록하여야 하기 때문에 식 (6)과 같이 안정된 누적 격자강도를 8등분하여 그에 해당되는 노출시간을 결정하게 된다. 이때, 식 (6)을 각 $n(1 \leq n \leq 8)$ 에 대하여 계산함으로써 각각의 노출시간인 t_n 을 계산해 낼 수 있다.

$$\frac{nA_{sat}}{8} = a_0 + a_1t_n + a_2t_n^2 + a_3t_n^3 + a_4t_n^4 \quad (6)$$

따라서, 식 (6)에서 산출한 노출시간 스케줄을 적용하여 포토폴리머에 회절격자를 기록한 후 측정된 회절효율의 분포는 그림 4(b)와 같다. 같은 방법으로 누적 격자강도를 구한 후 앞의 과정을 계속 반복 수행한 결과를 그림 4(c), (d)에 각각 나타냈다. 그림 4에서 굵은 실선은 회절효율의 평균값을, 가는 점선은 회절효율의 표준편차를 각각 나타낸 것이다. 그림 4의 (a), (b), (c), (d)의 결과를 분석해 보면 반복 실험을 할수록 평균값은 높아지면서 동시에 표준편차가 줄어드는 것을 볼 수 있다. 표 2는 이에 대한 결과를 수치적으로 나타낸 것이다.

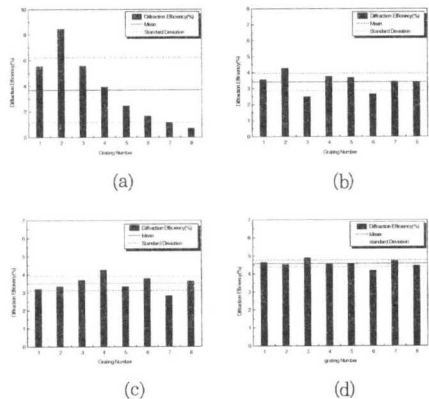


그림 4. 반복 실험에 따른 회절효율, 평균값 및 표준편차 변화 (a) 동일한 노출시간 적용 (b) 스케줄에 의한 노출시간 적용(첫 번째 수행) (c) 두 번째 수행 (d) 세 번째 수행

즉, 표 2에는 식 (1), 식(3), 식(4)를 이용하여 각 실험 결과에 대한 평균, 표준편차, 변동계수를 계산

하여 나타났다. 표 2에서 첫 번째 노출시간 스케줄에서는 변동계수 v 값이 68.47%로 나타났는데 이는 다시점의 회절격자의 회절효율이 평균값을 중심으로 비교적 넓은 68.47%범위 내에 분포한 다는 것을 의미한다. 그러나, 반복 수행함에 따라 변동계수는 16.95%, 11.34%, 4.21%로 급속히 그 값이 작아지는 것을 볼 수 있다. 이처럼 변동계수가 작아진다는 것은 각 회절빔의 회절효율은 높아지면서 균일하게 분포되어 간다는 것을 의미한다. 따라서, 제시된 노출시간 스케줄의 수학적 모델을 이용한 반복 수행을 통해 다중화된 회절격자의 균일한 회절효율을 얻을 수 있게 된다.

표 2. 반복실험에 따른 회절효율의 평균, 표준편차와 변동계수의 변화

	동일노출 시간	1차 반복수행	2차 반복수행	3차 반복수행
평균(m)	3.686%	3.402%	3.520%	4.573%
표준편차(σ)	2.524%	0.576%	0.399%	0.193%
변동계수(v)	68.47%	16.95%	11.34%	4.21%

V. 8시점 VHOE 광학판의 구현 실험 및 결과분석

본 논문에서는 세 번째 반복수행을 통하여 얻은 결과 값을 이용하여 8 시점의 회절격자를 기록하려는 포토폴리머(HRF-150-100, Dupont)의 노출시간 스케줄을 결정하고, 이를 이용하여 8시점의 VHOE 광학판을 실험적으로 구현하고 실험하였다. 그림 5는 본 논문에서 8시점의 VHOE 광학판의 제작과 기록된 다시점 회절격자로부터의 회절패턴을 측정하기 위한 전체적인 광학실험 시스템 도를 나타낸 것이다.

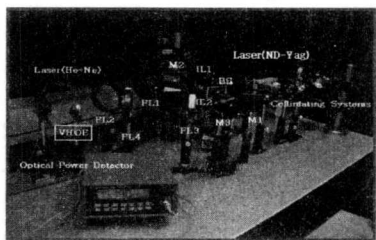


그림 5. 다시점 VHOE 광학판의 구현을 위한 광학실험 구성도

먼저, 그림 6은 제안된 노출시간 스케줄의 수학적 모델을 사용하여 반복실험을 통해 얻어진 누적 격자강도를 나타낸 그래프이다. 그림에서 볼 수 있듯이 실험을 반복 수행할수록 누적 격자강도(CGS, cumulative Grating Strength)의 그래프가 직선에 가

까워지는 것을 볼 수 있다. 이는 각 시점의 회절효율이 균일하게 분포되었다는 것을 의미한다. 따라서, 이를 통해 최적의 회절효율을 구할 수 있는 노출시간의 스케줄을 결정할 수 있는데, 그림 7은 8시점 VHOE 광학판을 포토폴리머에 제작하기 위한 최종 노출시간 스케줄을 나타낸 것이다.

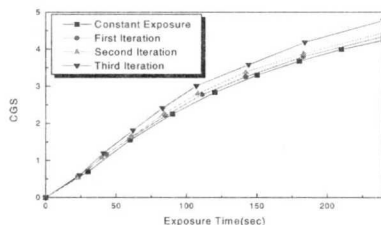


그림 6. 반복 실험에 따른 누적 격자강도 변화분포

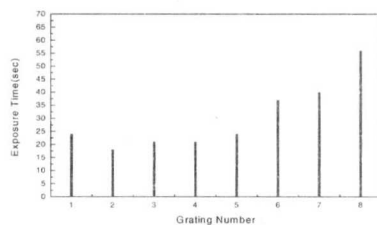


그림 7. 8시점 VHOE 구현을 위한 최적화된 노출시간 스케줄

그림 7과 같은 최적화된 노출시간 스케줄을 사용하여 8시점의 회절격자를 1.8도 씩 각도를 회전시키면서 각 다중화하여 포토폴리머에 기록함으로써 8시점의 VHOE 광학판을 제작하였다. 그리고, 제작된 8시점 VHOE 광학판에 기준빔을 시분할적으로 인가해 줌으로써 기록된 8시점의 회절격자로부터 각각의 회절빔을 얻을 수 있었다. 그림 8은 8시점 VHOE 광학판으로부터 회절되어 최종적으로 검출한 8개의 회절빔을 나타낸 것으로 8시점 모두 균일한 빔의 형태를 확인할 수 있었다.

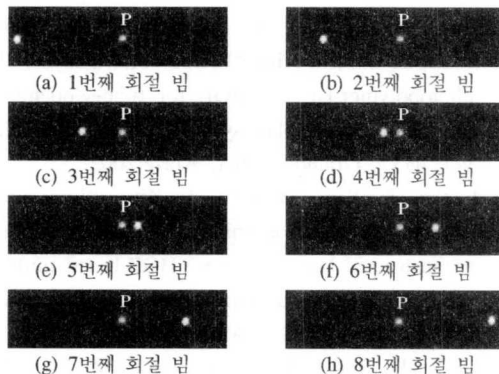


그림 8. 복원된 8시점의 회절빔

VI. 결론

본 논문에서는 최적화된 노출시간 스케줄을 이용한 포토폴리머(HRF-150-100)기반의 VHOE 광학판 구현기법을 제시하고 실험을 통해 8시점의 VHOE 광학판을 구현하였다. 즉, VHOE를 구현하기 위한 포토폴리머의 노출 에너지와 누적 격자강도 간의 관계를 나타내는 4차 다항식의 수학적 모델을 제시하고 이를 이용하여 다시점의 회절격자를 포토폴리머에 효과적으로 기록하기 위한 최적화된 노출시간 스케줄을 유도하였다. 그리고, 상용 포토폴리머를 이용한 8시점의 VHOE를 실제 제작하고 실험을 통해 입증함으로써 앞으로, 본 논문에서 제안한 최적의 노출시간 스케줄의 수학적 모델은 VHOE 기반의 다시점 스테레오 입체영상 디스플레이 시스템의 실질적인 구현에 응용이 가능하리라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 2000년도 국가지정 연구실 사업의 연구비 지원으로 이루어짐.

참고 문헌

[1] M.W.Jones, G.P. Nordin, J.H. Kulick, R.G. Lindquist and S.T.Kowel, "Real-time three dimensional display based-on the partial pixel architecture", Optics Letters, vol. 20, no.12, p. 15, 1995.

[2] Pierre St. Hilaire, Stephen A. Benton and Mark lucente, "Synthetic aperture holography: a novel approach to three-dimensional displays", J. Opt. Soc. Am. A, vol. 9, no. 11, 1992.

[3] Yoshihiro Kajiki, Hiroshi Yoshikawa, and Toshio Honda, "Autostereoscopic 3D video display using multiple light beams with scanning", IEEE Trans. on (T-CSVT) , vol. 10, no. 2, March, 2000.

[4] J. Gu, B. Cho, E. Kim, "Performance analysis of photopolymer-based VHOE for time-sequential multiview 3D display system", Proc. of SPIE, vol. 4712, Orlando, USA, April 2002.

[5] J. Gu, S. Kim, B. Cho, E Kim, "Exposure schedule scheme for uniform intensities of the reconstructed beams in the VHOE-based multi-view 3D Display System", Proc. of SPIE, vol. 4712, Orlando, USA, April 2002.

[6] Uh-Sock Rhee, H. John Caulfield, Joseph Shamir, Chandra S. Vikram, Mir M. Mirsalehi,

"Characteristics of the DuPont photopolymer for angularly multiplexed page-oriented holographic memories", Opt Eng., vol. 32, no.8, pp. 1839-1847, 1993.

[7] K. Curtis and D. Psaltis, "Characterization of the DuPont photopolymer for three-dimensional holographic storage", Appl. Opt, vol. 33, no. 23. pp 5396-5399, 1994.

[8] U. S. Rhee, H. J. Caulfield, C. S. Vikram, and J. Shamir, "Dynamics of hologram recording in DuPont photopolymer", Appl. Opt., vol. 34, no.5, pp. 846-853, 1995.

[9] E. Cetin, M. Horner, R. Ingwall, R, Minns, P. Panchu, D. Waldman, "Advantages of the CROP technology in Aprilis photopolymer recording media for high performance holographic storage systems", Technical report, Aprilis, USA, 1997.

[10] K. Curtis and D. Psaltis, "Recording of multiple holograms in photopolymer films", Appl. Opt., vol. 31, no. 35, pp. 7425-7428, 1992.

[11] A. Pu, K. Curtis and D. Psaltis, "Exposure schedule for multiplexing holograms in photopolymer films", Opt Eng., vol. 35, no. 9, pp. 2824-2829, 1996.

김 승 철(Seung-Chul Kim)

정회원



2002년 2월 : 광운대학교
전자공학과 졸업
2002년 3월~현재 : 광운대학교
전자공학과 석사과정
<주관심 분야> 3차원 영상 디스플레이, 홀로그래픽 메모리, 광공학

구 정 식(Jung-Sik Koo)

정회원



2000년 2월 : 광운대학교
전자공학과 졸업
2002년 2월 : 광운대학교
전자공학과 석사
2002년 3월~현재 : 광운대학교
전자공학과 박사과정

<주관심 분야> 3차원 영상 디스플레이, 홀로그래픽 메모리, 광공학

김 은 수(Eun-Soo Kim)

정회원

한국통신학회지 Vol.24, No. 9A 참조