

실시간 입체 영상 디스플레이를 위한 3차원 공간정합 필터의 합성

(Synthesis of 3-D Spatial Matched Filter for Real-time 3-D Image Display)

林善虎*, 金恩洙*

(Sun-Ho Lim and Eun-Soo Kim)

요 약

본 논문에서는 기존의 공간정합필터를 이용한 2차원 광상관기의 원리를 3차원 영역으로 확장함으로써 2차원 단면의 합으로 모델링된 3차원 물체를 공간상에 디스플레이 할 수 있는 새로운 접근방법을 제안하였다. 광상관기를 이용한 화소대 화소간의 상관첨두치의 배열로 임의의 영상구성이 가능함을 보이고 이를 입체영상 디스플레이에 응용하기 위해 Fresnel 회절식을 이용한 3차원 공간정합 필터의 합성과정을 제시하였다. 또한, 제시된 방법에 의해 계산된 필터함수를 기존의 실시간 디스플레이 소자인 LC-SLM상에 표현시 양자화 문제가 발생함을 보이고 여기에 따른 개선책으로 시그모이드 함수에 근거한 비선형 양자화 방법을 이용하여 고주파 부분의 정보손실을 줄이고 이로인한 회절효율의 상승과 바이어스 감소 효과를 얻을 수 있음을 보였다. 제시된 방법을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 검증한 후 상용 디스플레이 소자인 LC-SLM를 이용한 광학 실험을 통해 결과를 비교분석 하였다.

Abstract

In this paper, we present a new method to display 3-D image modelled as a sum of 2-D sliced images by expanding the concept of the conventional 2-D optical correlator based on spatial matched filter to the 3-D region. It is shown that a arbitrary image can be constructed by an array of the correlation-peaks between pixel-to-pixel and propose the synthesis procedure of 3-D spatial-matched-filter using Fresnel diffraction equation to display 3-D image in space. It is also shown that the quantization problem is severe when the synthesised filter function is displayed on the conventional LC-SLM. To overcome this problem, a nonlinear quantization method using the sigmoid function is suggested, and this method can reduce the bias & the loss of high spatial-frequency information, and improve the diffraction efficiency. Finally, the suggested method is tested by computer simulation and then approved by some optical experiments with the conventional LC-SLM.

I. 서 론

최근 정보화 사회를 맞아 정보의 양적 요구와 함께 질적 요구 또한 증가함에 따라 미국과 일본을 중심으

로 3차원 입체 영상을 시각화하려는 연구가 활발히 진행 중에 있으며 특히, 전송된 동영상의 3차원적 실시간 디스플레이 기술은 차세대 TV의 표준을 정하는 첨단 핵심기술이 될 것으로 기대되고 있다.^{[1] [2]}

1948년 Gabor^[3]에 의해 최초의 광홀로그래피 기술이 발표된 이후 Leith와 Upatniek^[4]에 의해 2개의 빔을 이용한 비축(off-axis) 홀로그램 실험을 통해 3차원 디스플레이를 위한 홀로그래피 방법의 잠재력을

* 正會員, 光云大學校 電子工學科

(Dept. of Electronic Eng., Kwangwoon Univ.)

接受日字:1997年3月21日, 수정완료일:1997年7月4日

인정받기 시작하였다. 일반적으로, 광홀로그래피 기술은 물체로부터 산란된 물체파와 기준파의 간섭무늬(fringe)를 기록매체에 기록한 후 기준파를 조사함으로써 물체로부터 산란된 빔을 재생하여 3차원 영상을 복원하는 기술을 말한다.

한편, 실제 물체가 아닌 가상물체에 대한 홀로그램 패턴을 컴퓨터 연산으로 얻고 이 정보를 다시 3차원 공간상에 디스플레이 하는 기술을 디지털 홀로그램(digital hologram) 또는 CGH(computer-generated hologram)라 한다.^[5] CGH는 1965년 Kozma와 Kelly에 의하여 처음 제시된후 Lohmann에 의하여 기본 형태가 구성되어 오늘에 이르고 있으며, 현재는 기존 광 홀로그래피에 대한 수학적 모델링의 발전으로 디지털적으로 3차원을 표현하는 중요한 부분으로 인식되고 있다. 특히, 다가올 21세기 고도 정보화 사회에서 모든 정보가 디지털 형태로 통합되고 있는 상황이므로 홀로그램의 디지털화가 매우 중요한 의미를 가지게 되고 이러한 접근 방법에 의한 차세대 3차원 영상 통신 시스템의 구현 연구가 활발히 진행되고 있다. 디지털 홀로그램 방법은 기존의 광홀로그래피 합성시 광소자 자체에서 발생하는 광학적 오차와 시스템 구성상에서 발생하는 오차를 없앨 수 있으며 가상물체의 모델링 방법에 따라 발생하는 데이터량을 줄일 수 있어 LC-SLM(liquid crystal-spatial light modulator)과 같은 제한된 해상도와 그레이 레벨 표현능력을 가진 공간광변조기 상에 적합한 홀로그램을 합성할 수 있다. 홀로그램을 디지털적으로 합성하는 과정은 먼저, 물체에서 산란되어 나오는 빛의 회절 패턴을 계산하는 과정^{[6]-[8]}과 복소값으로 구성된 이값을 실수화하는 인코딩과정으로 구성된다. 인코딩과정은 크게 셀단위(cell-oriented)코딩과 점단위(point-oriented)코딩방법으로 나눌 수 있는데 일반적으로 Lohmann형^[9]이나 Lee형^[10]의 셀단위 코딩된 홀로그램을 LC-SLM과 같은 디스플레이 소자에 표현시 소자의 픽셀간격이 Niquist 샘플링 조건을 만족시키지 못하는 경우가 다반사 이므로 포인트 단위의 코딩이 많이 이루어지고 있다. 이러한 LC-SLM에 적합한 CGH 합성 기술로 NJTC(nonlinear joint transform correlator)를 이용한 푸리에 홀로그램의 합성방법^{[11][12]}이 제안된바 있으나 이는 여러 가지 장점에도 불구하고 영상 복원 영역이 초점거리 부근으로 제한되므로 3차원 정보의 표현에는 한계가 있었다.

본 논문에서는 기존의 공간정합필터(spatial matched filter)를 이용한 2차원 광상관기의 원리를 이용해 영상합성이 가능함을 보이고 이를 3차원 영역으로 확장함으로써 2차원 단면의 합으로 모델링된 3차원 물체를 공간상에 디스플레이 할 수 있는 새로운 접근방법을 제안하였다. 또한 제시된 방법에 의해 얻어진 필터합수를 그레이레벨 표현에 한계가 있는 기존 공간광변조기상에 디스플레이 할 때 양자화 문제가 발생함을 보이고 여기에 따른 개선책으로 시그모이드(sigmoid)함수를 이용한 비선형 양자화 방법을 제시하였다.

제시된 방법의 검증을 위하여 시뮬레이션을 통하여 그 결과를 분석하였으며, 상용 디스플레이 소자인 LC-SLM을 이용한 시스템을 구성하고 광학 실험을 통해 성능을 평가하였다.

II. 광상관기에 의한 영상구성

일반적으로 광상관 시스템은 그림 1과 같이 두 개의 푸리에 변환렌즈를 이용하여 구성할 수 있다. x-y 평면은 공간좌표계 그리고 u-v 평면은 공간주파수 좌표계를 나타낸다.^[6] 초점거리 f를 갖는 렌즈 L₁은 푸리에 변환을 위하여 이용되고 우측의 렌즈 L₂는 역푸리에 변환을 위해 이용된다.

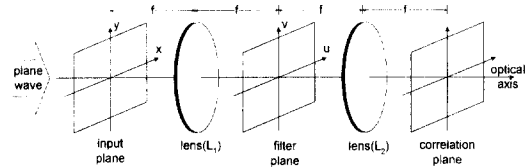


그림 1. 공간정합필터를 이용한 광상관기 시스템
Fig. 1. Optical correlator system using the spatial matched filter.

시스템은 입력영상이 존재하는 푸리에 입력 평면과 공간정합필터가 존재하는 필터평면 그리고 상관평면으로 구분된다. 유사도를 측정하기 위한 두 개의 평면은 필터 구성을 위한 기준평면과 입력되는 비교평면으로 구분하고 각각을 식(1)과 식(2)로 구성한다.

$$p_i(x, y) = \sum_j r_j(x-x_j, y-y_j) \quad (1)$$

$$p_o(x, y) = \sum_j o_j(x-x_j, y-y_j) \quad (2)$$

식(1)은 x-y평면상에 원점으로부터 x, y축으로 각

각 x_i, y_i 만큼 이동한 거리에 기준영상 $r_i(x, y)$ 가 n 개 위치한다는 것을 나타내며, 식(2)는 m 개의 물체영상을 나타낸다. 2차원 광상관은 두 평면중 기준 평면으로 설정된 식(1)을 공간 정합필터로 구성하고 주파수평면 상에서 식(2)를 입력받아 공간적으로 상관시켜 두 평면의 유사도를 측정하는 것으로 이루어진다. 필터 구성을 위한 영상이 존재하는 기준평면을 푸리에 변환하여 구성된 필터함수 $P_r(u, v)$ 는 식(3)과 같이 진폭과 위상 성분으로 나타낼 수 있다.

$$P_r(u, v) = K_0 \iint p_r(x, y) \exp[-j2\pi(ux + vy)] dx dy \quad (3)$$

$$= |P_r(u, v)| \exp[j\phi_{p_r}(u, v)]$$

식(3)에서 $P_r(u, v)$ 는 $p_r(x, y)$ 의 푸리에 변환을 나타내며 (u, v) 는 공간 주파수 좌표로서 $u = x/\lambda f$, $v = y/\lambda f$ 의 관계를 갖는다. λ 와 f 는 광원의 파장과 푸리에 변환렌즈의 초점거리를 나타내며 K_0 는 상수, $|P_r(u, v)|$ 와 $\exp[j\phi_{p_r}(u, v)]$ 는 $P_r(u, v)$ 의 진폭과 위상을 각각 나타낸다. 두 평면간의 유사도를 측정하기 위하여 주파수 영역에서 식(4)와 같이 식(3)의 주파수 평면을 공간정합필터로 구성하고 식(2)를 간섭시키면 식(5)의 상관결과를 얻을 수 있다.

$$C_{MSF}(u, v) = P_r^*(u, v)P_o(u, v) \quad (4)$$

$$= |P_r(u, v)||P_o(u, v)| \exp[-j\phi_{p_r}(u, v)] \exp[j\phi_{p_o}(u, v)]$$

$$c_{MSF}(x, y) = \mathcal{F}^{-1}\{C_{MSF}(u, v)\} \quad (5)$$

여기서, 기준평면에 하나의 기준물체가 존재하고 비교 평면에 m 개의 다중물체가 존재한다고 가정하면 식(4)와 식(5)는 식(6)과 (7)로 나타낼 수 있다. 식(6)은 주파수 평면에서 기준 평면의 물체 함수 $r_0(x-x_0, y-y_0)$ 의 정합필터로 구성하고 비교 평면에 존재하는 다중 물체 $o_j(x-x_j, y-y_j)$, ($j=1, 2, \dots, m$)와 간섭을 일으킨 것을 나타낸다. 식(7)에서 \otimes 는 상관(correlation)을, $*$ 는 컨볼루션(convolution)을 나타낸다. 이식은 두 물체 영상이 위치한 거리차 지점에서 두 물체 영상간의 상관관이 발생하는 것을 나타내고 있다.

$$C_{MSF} = R_0^*(u, v) \exp\{j2\pi(ux_0 + vy_0)\} \sum_{j=1}^m O_j(u, v) \exp\{-j2\pi(ux_j + vy_j)\} \quad (6)$$

$$= \sum_{j=1}^m |R_0(u, v)||O_j(u, v)| \exp\{-j\phi_{R_0}(u, v)\} \exp\{j\phi_{O_j}(u, v)\} \exp\{j2\pi[u(x_0 - x_j) + v(y_0 - y_j)]\}$$

$$c_{MSF}(x, y) = \mathcal{F}^{-1}\{C_{MSF}(u, v)\} \quad (7)$$

$$= \sum_{j=1}^m r_0(x, y) \otimes o_j(x, y) * \delta(x+x_0-x_j, y+y_0-y_j)$$

식 (7)에서 $\sum_{j=1}^m o_j(x, y)$ 가 미소물체 즉, δ 함수를 영상의 형태로 배치한 것이라 하고 기준영상 r_0 또한 δ 함수라 가정하면 식(8)로 표현할 수 있다. 이는 영상대 영상간의 상관관이 아닌 하나의 화소와 화소의 배열로 이루어진 영상간의 상관으로 해석할 수 있으며 상관관계가 미세물체간의 상관을 이용해 상관침두치의 위치를 변화시킴으로써 임의의 영상을 구성할 수 있음을 나타낸다.

$$c_{MSF}(x, y) = \sum_{j=1}^m \delta(x, y) \otimes \delta(x, y) * \delta(x+x_0-x_j, y+y_0-y_j) \quad (8)$$

$$= \sum_{j=1}^m \delta_j(x+x_0-x_j, y+y_0-y_j)$$

즉, 그림 1의 광상관기를 영상구성을 위한 홀로그래프의 재생 관점에서 보면 입력평면은 기준과가 입사되는 기준평면으로, 필터 평면은 홀로그래프 평면으로 그리고 상관평면은 영상이 복원되는 복원 평면으로 해석할 수 있다.

III. 상관평면의 3차원 확장

이상에서 상관기를 이용해 화소대 영상간의 상관을 일으켜 임의의 영상을 구성할 수 있음을 보였다. 하지만 이와 같은 공간정합필터의 합성은 Fraunhofer 영역에서 이루어지게 되며 이로 인해 상관 침두치 역시 렌즈의 초점거리 부근에서만 나타나므로 3차원 입체영상 구성에 있어서는 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해서는 상관시 입력평면을 초점거리 이전으로 확장하는 것이 요구되며 이것은 Fresnel 회절식을 이용한 3차원 공간정합필터를 제작함으로써 가능하다.¹¹³

¹ 공간정합필터는 Fresnel 회절식에 의해 Fraunhofer 영역에서 Fresnel 영역으로의 확장되며 그 개념을 도식적으로 살펴보면 그림 2와 같다.

기준점광원이 위치한 물체 평면에 평면파가 입사되며, 3차원 확장을 위해 2차원 단면으로 모델링된 물체는 렌즈 초점거리 이전의 N 개의 평면상에 각각 일정한 간격으로 위치하게된다. 여기에 기준평면에 입사된 평면파와 다른 경로를 통해 형성된 평면파가 입사되어 이로부터 산란되어 나오는 물체파와 렌즈의 초점거리

에 위치한 기준 점광원으로 부터 푸리에 변환되어 입사되는 기준파가 Z_0 인 필터 평면상에서 더해지고 이들이 서로 간섭을 일으켜 세기정보 형태로 기록된다.

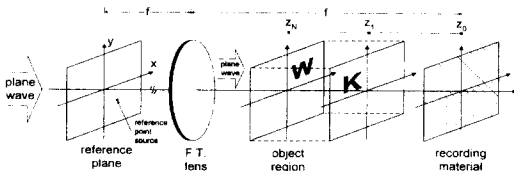


그림 2. 3차원 공간합필터 합성 개념도
Fig. 2. Diagram of 3-D spatial matched filter synthesis.

합성과정을 수식적으로 살펴보기 위해 1 번째 평면에 위치한 미세물체의 배열로 구성된 물체가 반사계수 함수 $p(x_i, y_i)$ 를 가진다고 하자. N개의 각 단면들로부터 산란되어 물체로부터 일정 거리만큼 떨어진 필터 평면 (u, v) 에 도달하는 광파를 계산하기 위해 하나의 단면에 대해서 산란패턴을 계산하는 방법은 다음과 같다.

하나의 단면이 (x_i, y_i) 평면에 놓여 있고 필터평면까지의 거리가 Z_i 이라 하면 산란패턴 $S_i(u, v)$ 는 Fresnel근사식에 의해

$$S_i(u, v) = \exp\left[j\frac{\pi}{\lambda Z_i}(u^2 + v^2)\right] \mathcal{F}\left[p(x_i, y_i) \exp\left[j\frac{\pi}{\lambda Z_i}(x_i^2 + y_i^2)\right]\right] \quad (9)$$

으로 표현할 수 있으며 복원시 세기정보만을 관찰한다고 가정하면 식(9)는

$$S_i(u, v) = \exp\left[j\frac{\pi}{\lambda Z_i}(u^2 + v^2)\right] \mathcal{F}\left[p(x_i, y_i)\right] \quad (10)$$

로 간략화 시킬 수 있다. 각각의 평면에 대해 계산된 산란패턴은 필터 평면에서 선형적으로 중첩되어

$$S(u, v) = \sum_{i=1}^N S_i(u, v) \quad (11)$$

를 이루게 되며 $S(u, v)$ 는 기준평면에서 점광원으로 입사되어 푸리에 변환된 기준파와 간섭을 일으켜 식(12)의 세기 정보로 바뀌어 필터함수 $T(u, v)$ 를 이룬다.

$$\begin{aligned} T(u, v) &= |S(u, v) + R(u, v)|^2 \\ &= |S(u, v)|^2 + |R(u, v)|^2 + S(u, v) \cdot R(u, v) + S(u, v)^* \cdot R(u, v)^* \\ &\quad (\text{where } R(u, v) = \mathcal{F}[\delta(x - x_0, y - y_0)]) \end{aligned} \quad (12)$$

식(12)중 $|S(u, v)|^2$ 항과 $|R(u, v)|^2$ 항은 상관 평면상

에서 자기 상관으로 나타나 에너지 효율과 상관효율을 낮추는 요인으로 작용하며 영상복원과는 아무 관련이 없으므로 계산과정에서 제거할 수 있다. 두 항이 제거된 최종 필터함수는 식(13)과 같이 나타낼 수 있고 이는 $S(u, v)$ 와 $R(u, v)$ 가 복소적으로 곱해진 후 연산자 $\text{Re}[\cdot]$ 를 통해 실수부만을 취함으로써 간단히 계산된다.

$$\begin{aligned} T(u, v) &= |S(u, v) + R(u, v)|^2 - |S(u, v)|^2 - |R(u, v)|^2 \\ &= S(u, v) \cdot R(u, v) + S(u, v)^* \cdot R(u, v)^* \\ &= \text{Re}[S(u, v) \cdot R(u, v)] \end{aligned} \quad (13)$$

IV. 정규화 및 양자화

광학적 복원을 위하여 식(13)의 필터함수 $T(u, v)$ 를 LC-SLM상에 디스플레이 하려면 LCD구동기와 호환 가능한 신호로 바뀌어야 하는데 이때 정규화(normalization)와 양자화(quantization)과정이 필수적이다. 광학 실험에 사용될 LC-SLM은 컴퓨터에서 전송되는 256레벨의 그레이신호를 입력으로 받아 동작하므로 0에서 255값을 갖도록 정규화 시켜 사용한다. 양자화 과정에서 발생하는 문제점을 지적하기위해 그림 3의 (a)와 같은 자연환경에서 얻을 수 있는 일반적인 영상을 대상으로 그 푸리에 스펙트럼의 실수부가 갖는 값의 형태를 살펴보았다. 그림 3의 (b)는 (a)영상에 대한 푸리에 스펙트럼의 실수값을 -100에서 100의 값을 갖도록 정규화 한 후 그 분포와 크기 비교가 쉽도록 공간주파수 축인 u축을 중심으로 90도만큼 회전하여 u축 상으로 투영하여 나타낸 것이다. 여기서, u축의 중심 즉, 저주파부분의 정보는 매우 큰 값을 가지지만 그 분포범위가 좁으며 고주파성분으로 갈수록 작은 값들이 0값을 중심으로 미세한 변화량을 가지고 넓게 분포하고 있음을 알 수 있다. 우리가 영상통신을 목적으로 사용하는 데이터들은 대부분 이러한 자연환경에 존재하는 물체를 대상으로 하며 특히 필터의 합성을 위해 모델링된 각각의 단면들은 서로 유사한 형태를 갖게되므로 이 단면들이 푸리에 변환되어 계속 중첩된다면 위의 편위 현상은 더욱 두드러지게 나타날 것이다.

따라서, 계산된 수치들을 그대로 선형 양자화 한다면 미세한 변위를 갖는 값들이 어느 한 값으로 대응되게 되며 이때 영상의 형태 정보를 가지고 있는 고주파 부

분의 정보를 대부분 잃어버리게 된다. 또한 이 부분에서 회절되지 않은 빛이 바이어스로 나타나 복원영상의 S/N비를 저하시키는 요인으로 작용한다. 이러한 현상은 모델링된 단면으로 합성된 필터의 중첩 수가 많을수록 또 각각의 단면을 이루는 화소의 수가 많을수록 더욱 심각하게 작용한다.

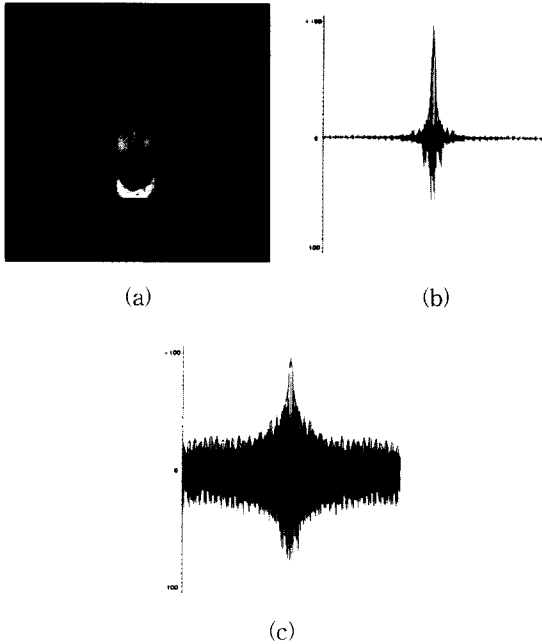


그림 3. (a) 일반적인 영상 (b) (a)영상에 대한 푸리에 스펙트럼의 실수부 분포 (k=1.0) (c) 비선형함수에 의해 확장된 스펙트럼 (k=0.5)
Fig. 3. (a) General image (b) Real value of Fourier spectrum (k=1.0) (c) Expanded spectrum by nonlinear function (k=0.5).

본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 비선형 양자화 방법을 이용하였다. 비선형성을 부여하기 위하여 제공되는 시그모이드 함수는 그림 4와 같으며, 여기서 가로축은 식(13)에 의해 구성된 필터함수를 나타내는 것이고 세로의 출력 축은 디스플레이 장치에 나타나는 값이다. 주어진 함수에 의해서 재구성된 필터 함수를 $T_M(u, v)$ 라 하면 이는 식(14)로 나타낼 수 있다.

$$T_M(u, v) = |T(u, v)|^k \operatorname{sgn}[T(u, v)] \quad (14)$$

여기서, 연산자 $\operatorname{sgn}[\bullet]$ 는 signum 함수를 나타내며, k는 비선형 특성을 결정하는 매개변수로(0.0 ≤ k ≤ 1.0)의 범위에서 실수 값으로 결정된다.^[14] k=1.0인

경우 그림 3의 (b)와 같이 선형적인 출력 결과를 산출하며 k값이 0.0에 가까워질수록 그림 3의 (c)와 같이 한 값으로 양자화 되었던 고주파 영역에 작은 값들은 확장되어 양자화 과정에서의 정보손실을 줄일 수 있다.

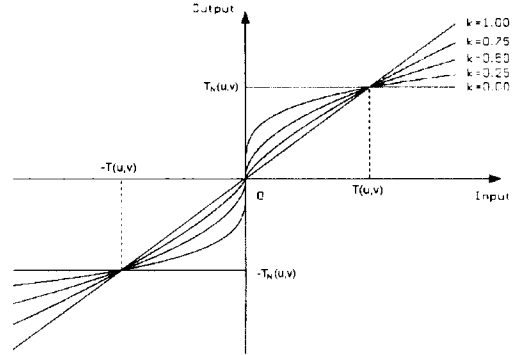


그림 4. 비선형 양자화를 위한 시그모이드 함수
Fig. 4. Sigmoid function for nonlinear quantization.

k=0.0일 때 $T_M(u, v)$ 는 2진 값을 갖게되며 이때 회절효율이 가장 높아져 바이어스가 감소하지만 고주파 부분이 지나치게 강조되어 영상 복원시 외각선 선분만이 강조되는 현상이 발생한다. 그러므로 입력영상의 종류에 따라 영상의 형태를 최대한 유지하면서 바이어스를 줄일 수 있는 적절한 k값의 선택이 요구된다.

이상에서 설명한 3차원 공간정합필터의 합성과정을 블록 다이어그램으로 요약하면 그림 5와 같다. 먼저, 3차원 영상이 거리에 따른 2차원 단면의 합으로 모델링되고 각각의 단면에 대해 산란패턴이 계산되어 각 단면이 위치한 거리에 따라 계산된 위상항이 곱해진다. 이렇게 계산된 복소값은 코딩과정을 통해 실수화되고 LC-SLM 드라이버와 호환 가능한 신호로 바뀌주기 위해 정규화와 양자화 과정을 거쳐 최종 필터함수로 저장된다.

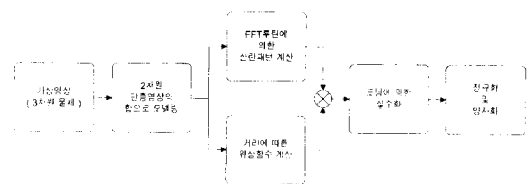


그림 5. 3차원 공간정합필터의 합성과정도
Fig. 5. Block-diagram of 3-D spatial matched filter synthesis.

그림 6은 식 (14)에 의해 합성된 3차원 공간정합필터를 이용한 영상복원 과정을 나타낸 것이다. 기준 점 광원이 위치한 기준평면에 평면파가 입사되고 푸리에 변환 렌즈를 통과한 후 필터평면 Z_0 에서 3차원공간정합 필터와 복소적으로 곱해진다. 복원 영역에서 필터 평면을 통과한 빛의 상관결과가 N개의 평면으로 나타남에 따라 3차원 영상을 이루게 된다.

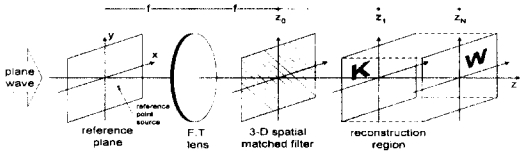


그림 6. 3차원 공간정합필터를 이용한 광상관 시스템
 Fig. 6. Optical correlator system using the 3-D spatial matched filter

V. 실험 및 결과분석

제시된 방법을 특정 영상 합성에 응용하기 위하여 임의의 가상물체를 선정해 이에대한 3차원 공간 정합 필터를 합성하고 다양한 조건하에서 시뮬레이션 및 광학적 복원결과를 비교하였다.

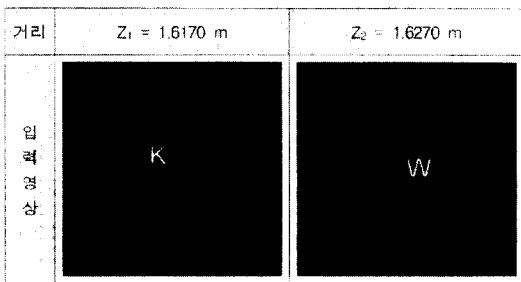


그림 7. 입력영상
 Fig. 7. Input Images.

입력영상은 그래픽 툴을 이용해 그림 8과 같이 0의 그레이 레벨 값을 갖는 256×256 평면안에 그레이 레벨 255값으로 구성된 30×30 픽셀을 갖는 영문자 "K"와 "W"를 각각 $Z_1=1.6170\text{m}$, $Z_2=1.6270\text{m}$ 에 위치시켜 제작하였다. 그림 8은 그림 7의 입력영상을 사용해 합성한 필터 패턴과 그 히스토그램, 그리고 $Z=1.6170\text{m}$ 에서의 복원영상 "K"를 비선형 정도를 결정하는 변수 k값의 변화에 따라 나타낸 것이다.

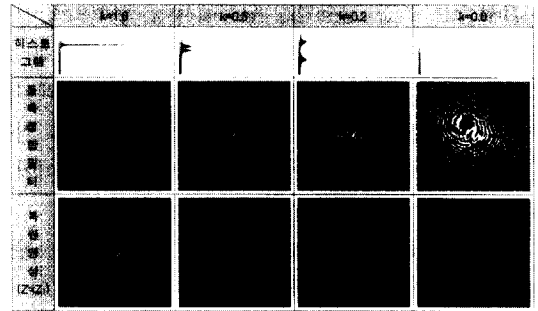


그림 8. 동축 3차원 공간정합필터에 대한 시뮬레이션 결과
 Fig. 8. Simulation result of on-axis 3-D spatial matched filter.

입력영상과 필터 패턴은 LC-SLM이 입력받을 수 있는 신호인 256그레이 레벨의 값을 갖도록 정규화시켜 표현하였다. 히스토그램과 정합필터의 패턴에서 볼 수 있듯이 k가 1.0일 때 즉 선형 양자화 되었을 때는 고주파 부분의 정보가 히스토그램 상에서 최대를 이루는 어느 한 값으로 대응되어 이 부분의 정보손실과 함께 회절되지 못한 빛에 의한 바이어스로 인해 복원영상이 거의 알아볼 수 없게 나타났다. k값이 0.0에 가까워질수록 어느 한 값에 집중되어 있던 필터 패턴이 넓은 범위로 확장되고 손실되었던 고주파 부분의 정보가 살아나면서 회절효율이 높아지게 되어 이로 인한 바이어스의 감소로 보다 선명한 복원영상을 얻을 수 있었다. k=0.0인 경우 필터 패턴은 완전 2진 값을 갖으며 빛의 회절효율이 가장 높아져 바이어스가 거의 대부분 제거되었지만 고주파성분의 강제적 확장으로 인해 복원영상의 외각선 성분이 강조되어 나타남을 알 수 있다.

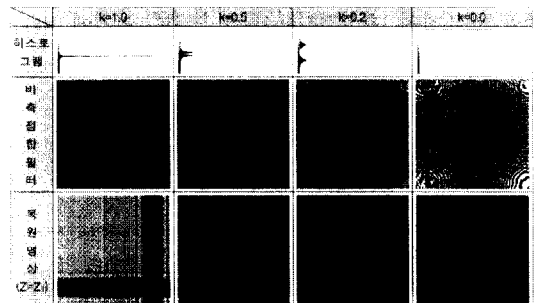


그림 9. 비축 3차원 공간정합필터에 대한 시뮬레이션 결과
 Fig. 9. Simulation result of off-axis 3-D spatial matched filter.

그림 9는 기준 점광원을 원점에서 x, y축으로 각각 40픽셀만큼 이동해 위치시켜 비축 기준파를 만든 후 합성한 비축 3차원 공간정합필터에 대한 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 이 경우 기준파의 각도가 커질수록 고주파 성분이 늘어나지만 복원영상을 바이어스로부터 분리시킬 수 있다는 장점이 있다.

$k=1.0$ 인 경우 히스토그램을 보면 편위 정도가 동축 정합필터의 경우보다 한곳에 더 집중되어있음을 알 수 있다. 이는 양자화 과정에서 고주파 부분의 정보를 더 많이 잃어버렸다는 것을 의미하지만 복원영상이 바이어스가 없는 곳에 위치하므로 동축 정합필터의 경우보다 문자의 구분이 용이하였다. 또한, Z_2 의 위치에서 복원되는 "W"자에 관한 결과도 "K"자의 경우와 동일하게 나타났다.

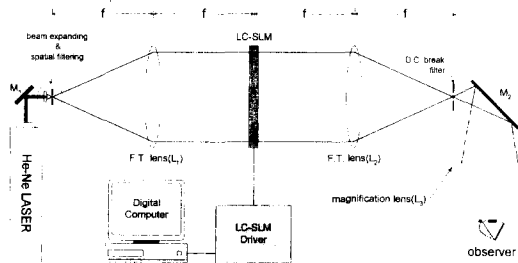


그림 10. 광학적 복원시스템
Fig. 10. Optical reconstruction system.

그림 10은 합성된 3차원 공간정합 필터의 실시간 디스플레이를 위한 광학 시스템을 나타낸 것이다. 공간 필터는 미세 점광원으로 작용하며 이것이 렌즈 L1을 통과해 푸리에 변환된 후 디지털 컴퓨터에 의해 계산된 LC-SLM상에 전송된 3차원 공간정합필터와 복소적으로 곱해진다. LCD를 통과한 빛은 다시 푸리에 변환렌즈를 통과하여 초점거리에서 집중되며 여기에 바이어스 제거 필터를 위치시켜 회절되지않은 빛을 차단시켜 주었다.

표 1. LC-SLM 사양
Table 1. LC-SLM Specification.

Model	Epson P13VM215
Type	Poly-Si TFT LCD MODULE
Size	26.9mm × 20.2mm
Pixel	640 × 480 = 307,200개
Contrast	200 : 1

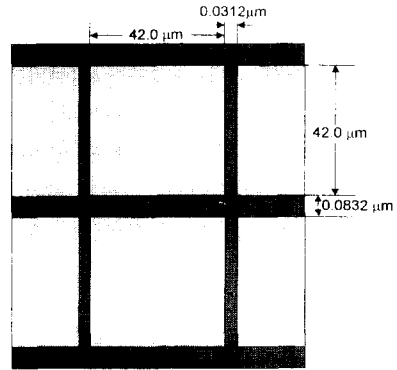


그림 11. LC-SLM의 Pixel과 Grid 패턴
Fig. 11. Pixel & Grid pattern of LC-SLM.

합성된 필터합수를 나타내는 입력장치는 640×480 화소를 갖는 Epson사의 LC-SLM(모델:P13VM215)을 진폭 변조기 형태로 사용했으며 그 특성사양은 표 1과 그림 11에 나타내었다.

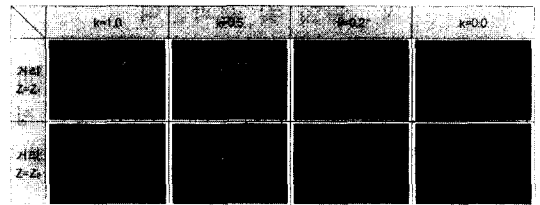


그림 12. 동축 3차원 공간정합필터의 광학적 복원결과
Fig. 12. Optically reconstructed images of on-axis 3-D spatial matched filter.

그림 12와 13은 위의 광학 시스템을 통해 복원된 재생실상을 CCD카메라로 검출한 것이다. k 값에 따른 복원영상의 변화를 보면 앞서 보인 시뮬레이션결과와의 일치한다는 것을 알 수 있다.

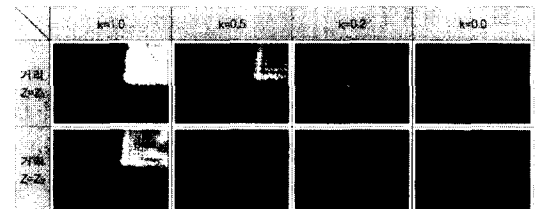


그림 13. 비축 3차원 공간정합필터의 광학적 복원결과
Fig. 13. Optically reconstructed images of off-axis 3-D spatial matched filter.

그림 12와 13의 결과에서 보면 k 값이 0.2이하인 경

우에는 동축이나 비축 모두 광효율이 높고 바이어스나 잡음이 거의 없는 복원영상을 얻을 수 있었지만 영상의 외각선 성분이 강조되어 복원되었고, 비축의 경우 동축보다 좀더 높은 레벨의 바이어스가 관찰되었다. k 값이 0.5이하인 경우 광효율이 떨어지며 동축 정합필터의 경우 바이어스로 인한 복원영상의 식별이 거의 불가능하였으나 비축인 경우 복원영상이 바이어스와 분리되므로 영상의 면적성분을 어느 정도 유지하면서 바이어스의 영향을 줄일 수 있어 입력영상과 비교적 가까운 형태의 복원영상을 얻을 수 있었다.

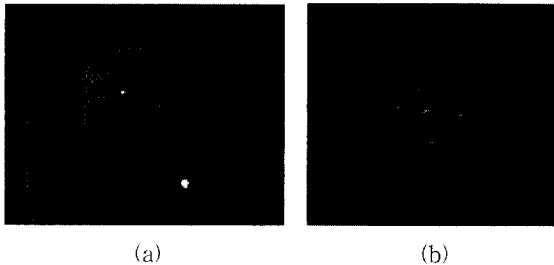


그림 14. (a) 복원 허상 (b) "KW"가 확대된 모습
Fig. 14. (a) Virtual image of reconstructed image (b) Magnified image of "KW".

그림 14는 k값을 0.5로 설정해 합성한 비축 정합필터 재생시 LC-SLM후면에서 형성되는 복원 허상을 비디오카메라를 이용해 "K"자와 "W"자위치의 중간부분에 초점을 맞춰 촬영한 것이다. 허상의 관찰은 사용된 소자의 한계로 인해 시야각(viewing angle)과 시야영역(viewing zone)이 제한되므로 3차원 거리정보를 느끼는데 있어 가장 중요한 요소인 양안시차에 의한 3차원 영상 인식이 제한되고 또한, 지면상에 3차원 정보를 표현하기는 어려우므로 운동시차(motion parallax)의 관찰로 복원되는 영상이 3차원 거리정보를 가지고 있음을 보인 것이 그림 15와 그림 16이다. 그림 15는 입력영상으로 사용된 Z축에 수직인 2개의 동심원과 관찰자의 위치를 중심과 상, 하, 좌, 우(C:center, U:up, D:down, R:right, L:left)로 표시하여 나타낸 것이다. 관찰자의 시점이 이동할 때 근거리 에 위치한 원 C₁은 시점의 이동과 반대 방향으로 움직임이 크게 나타나고, 원거리 에 위치한 원 C₂는 그 움직임이 작게 나타나게된다. 이러한 현상으로 관찰자의 시점이 이동하는 방향으로 작은 원 영상이 큰원쪽으로 편위되는 것처럼 느끼게된다. 그림 16은 두 개의 원 영상에 대한 재생허상을 비디오 카메라의 위치를

변화시켜가며 촬영한 것이다. 운동시차 역시 시야각의 제한으로 이동가능 거리가 짧아 편위 현상이 두드러지지 않는 않지만 어느 정도 육안 관찰이 가능하였다.

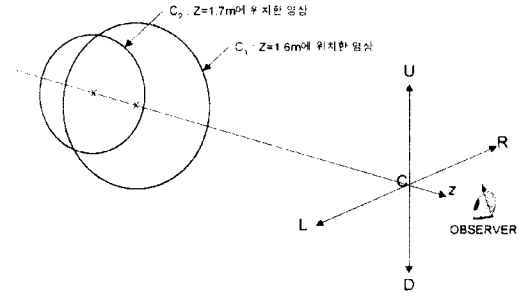


그림 15. 운동시차 관찰을 위해 제작된 입력영상
Fig. 15. Input image for observation of motion parallax.

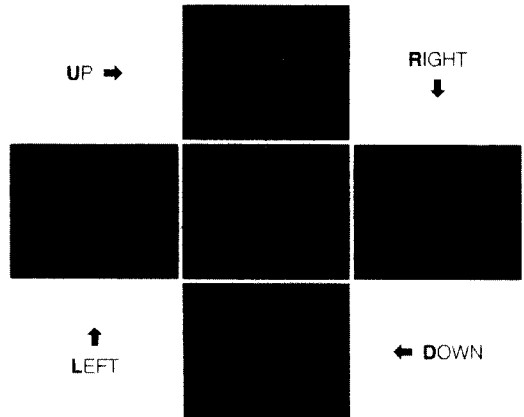


그림 16. 복원 영상의 운동시차 관찰
Fig. 16. Observation of motion parallax.

이상에서, 3차원 공간정합필터의 제작 과정, 디스플레이 과정에서 발생하는 문제점과 그 해결방안은 제시하고 시뮬레이션과 실험을 통해 그 성능을 평가하였다. 제안된 방법을 통해 3차원 영상을 그레이레벨 표현에 한계가 있는 LC-SLM을 사용해 공간상에 디스플레이 하는 것이 가능하며 또, LC-SLM의 디스플레이가 비디오 프레임(30frame/sec)으로 이루어지므로 합성된 필터함수를 LC-SLM상에 실시간적으로 전송해 줌으로써 간단한 홀로그래픽 3차원 동영상의 구현도 가능하다.

VI. 결론

본 논문에서는 기존의 2차원 광상판기의 원리를 확

장하여 3차원 공간정합필터를 제작함으로써 2차원 단면의 합으로 모델링된 3차원 가상 물체를 공간상에 디스플레이 할 수 있는 새로운 접근 방법을 제안하였다. 제안된 3차원 공간정합필터 방법은 기준 점광원이 위치한 기준평면을 FFT하는 것만으로 임의의 각도로 입사하는 비축 기준과 형성이 가능해 복원 영상의 바이어스로부터의 영향을 줄일 수 있다. 또한, 필터평면 상에서의 스펙트럼 재구성으로 양자화 과정에서 나타나는 고주파 부분의 정보손실을 최소화할 수 있으며 이로인한 회절효율의 상승과 바이어스감소 효과를 얻을 수 있었다.

앞으로 디스플레이소자의 발전이 뒤따른다면 CT, MRI, X-ray 등으로부터 얻은 2차원 단층 영상들을 종합하여 3차원 영상을 만드는 의료진단장비 또는, 동영상을 이용한 입체광고나 게임기 등에 응용될 수 있으며 특히, 홀로그래픽 TV 등 미래 정보산업 분야에 활용도 가능하리라 전망된다.

참 고 문 헌

- [1] T. Okoshi, "Three-dimensional display," Proc. IEEE, vol. 68, no. 5, pp. 548-563, 1980.
- [2] T. Motoki, H. Isono, and I. Yugama, "Present status of three-dimensional television research," Proceedings of IEEE, vol. 83, no.7, pp. 1009-1021, 1995.
- [3] D. Gabor, "A new microscope principle," Nature, vol. 161, pp. 777, 1948.
- [4] E. N. Leith and J. Upatnieks, J. Opt. Soc. Am. vol. 52 pp. 1377 1962.
- [5] Thomas S. Huang, "Digital Holography," Proc. IEEE, vol. 59, no. 9, pp. 1335-1346, 1971.
- [6] A. VanderLugt, "Signal detection by

complex spatial filtering," IEEE Trans. Infor. Theory, vol. IT-10, pp. 139-145, 1964.

- [7] Y.H Wu and P. Chavel, "Cell oriented on-axis computer generated holograms for use in the Fresnel diffraction mode," Appl. Opt. vol. 23 no. 2, pp. 228-238, 1984.
- [8] H. Yang and Eun-Soo Kim, "Waveform decomposition-based algorithm for horizontal parallax-only-display computer-generated holograms," Opt. Lett., vol. 21, no. 7 pp. 510-512, 1996. 4
- [9] B.R. Brown and A.W. Lohmann, "Complex spatial filtering with binary masks," Applied Optics, vol. 5.6, pp. 967-970, 1966.
- [10] W.H. Lee "Computer-generated holograms: techniques and applications," Progress in optics, vol. XVI, pp. 120-232, 1978.
- [11] 임선호, 이상이, 양훈기, 김은수 "NJTC에 의한 푸리에 홀로그램의 새로운 합성방법," 한국통신학회 추계종합학술발표대회 논문집, 14권 2호, pp. 943-946, 1995
- [12] 임선호, 이상이, 김은수 "비선형함수를 이용한 홀로그램 패턴의 양자화," 대한전자공학회 하계 종합학술대회 논문집, 19권 1호, pp. 943-946, 1996
- [13] Jeffrey A. Davis, Don M. Cottrell, Jeffrey E. Davis, and Roger A. Lilly "Fresnel lens-encoded binary phase-only filters for optical pattern recognition," Opt. Lett., vol. 14, no. 13, pp. 659-661 1989.
- [14] 이상이, 양훈기, 김은수, "Sigmoid 함수를 이용한 NJTC 시스템의 상관판별력 해석," 대한전자공학회 하계종합학술대회 논문집, 17권, 1호 pp. 271-274, 1994

저 자 소 개



林善虎(正會員)

1995년 2월 경기대학교 전자공학과 학사. 1995년 8월 ~ 현재 광운대학교 전자공학과 석사과정. 관심분야는 3차원 영상통신, 광신호처리

金恩洙(正會員) 第34卷 7號 D編 參照

현재 광운대학교 전자공학과 교수