

空間的 光信號 變調를 위한 液晶디스플레이의 두께 不均一性 補償 및 그 光變調 特性

(Compensation of the Thickness Nonuniformity in an LCD for Optical
Spatial Light Modulation and its Optical Modulation Properties)

鄭信一*, 金弘晚**, 鄭宰宇**, 姜珉鎬**, 金秀重***

(Shin Il Jeong, Hong Man Kim, Jae Woo Jeong, Min Ho Kang
and Soo Joong Kim)

要 約

코우히어런트 광정보처리에서 공간광변조기의 두께는 매우 균일하여야 한다. 최근 상용화된 휴대용 액정 텔레비전의 액정디스플레이는 가격이 대단히 저렴하여 공간광변조기로 기대되고 있으나 두께가 충분히 균일하지 못한 단점이 있다. 그래서 공간광변조기로 사용하기 위하여 두께 불균일에 의한 공간적 위상차를 보상하여야만 한다.

본 논문에서는 다른 방법에 비해 비교적 간편하게 위상을 보상할 수 있는 방법을 제안하였으며 결합변환 광상관기(joint transform optical correlator) 개념을 적용하여 실험적으로 확인하였다.

Abstract

For coherent optical information processing the thickness uniformity of the spatial light modulators (SLMs) is highly demanded. The liquid crystal display (LCD), which is commercialized as a pocket-sized television, is considered as one of the most cheap 2-dimensional SLM. But usually it has lack of thickness uniformity. Thus phase correction to compensate the thickness nonuniformity must be preceded before it is used as an SLM.

In this paper relatively easy phase compensation method applicable to binary SLMs is discussed and experimentally verified by using the optical joint transformation concept.

I. 서 론

광정보처리에서 그 장점인 2 차원의 병렬 고속처리의 특성을 충분히 이용하기 위하여 공간광변조기가 필수적이다. 따라서 각종의 공간광변조기가 많이 연구되고 또 개발되고 있으나 아직 그 가격이 엄청나게 비싸거나 개발 단계에 있어 사용이 제한되고 있는 실정이다. 최근 액정디스플레이(liquid crystal display: LCD)가 소형의 휴대용 액정 텔레비전 용도로 상용화되고 있는데 기존의 공간광변조기에 비해 가격이 매우 저렴하며 별도의 구동회로 없이도 영상신호의 입력이 가능하

*正會員, 釜山水産大學 電子通信科
(Dept. of Electronics and Communication Eng.,
Nat'l Fisheries Univ. of Pusan)

**正會員, 電子通信研究所 光通信시스템研究室
(Photonics Systems Section, ETRI)

***正會員, 慶北大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Kyungpook Nat'l Univ.)
接受日字: 1987年 2月 9日

다는 등의 장점이 있어 LCD를 공간광변조기로 이용하고자 하는 제안들이 발표되고 있다.^{1)~4)}

그러나 액정텔레비전 용도의 LCD를 공간광변조기로 이용하기 위해서는 우선 LCD의 두께가 충분히 균일하여야 하는데 시판되고 있는 LCD는 액정층 양쪽의 유리 기판이나 혹은 부착된 편광판으로 인하여 불균일한 두께의 공간분포를 가지고 있다. 이러한 LCD의 두께 불균일성은 곧 공간적인 위상 불균일성을 초래하므로 공간불변 광상관기에의 공간광변조기로서의 이용에 제약을 가하게 된다. 이것을 보상하기 위하여 LCD를 굴절을 정합액(index matching oil)에 담그거나¹⁾ 위상공액파를 이용하는²⁾ 방법들이 제안되었다. 이러한 방법들은 별도의 광학 부품을 사용하여야 되기 때문에 실험상 번거롭거나 혹은 광의 이용 효율을 저하시키는 결과를 초래하게 된다.

본 논문에서는 Mach-Zehnder 간섭법에 의하여 측정된 두께 데이터로부터 별도의 광학 부품을 사용하지 않고 LCD 내에 이진 홀로그래를 입력할 때 소프트웨어적으로 위상보정을 가할 수 있는 방법을 제안하였다. 이것을 비교적 실험이 간단한 결합변환 광상관기(joint transform optical correlator) 개념을^{5)~7)} 적용하여 두께 보상된 이진 홀로그래를 LCD에 입력한 후 광학적 재생을 통해 위상보상이 되는 것을 실험적으로 확인하였다.

II. LCD의 두께 불균일성의 보상원리

LCD 면에 수직으로 평면파가 입사할 때 두께 불균일로 인한 광학적 위상차는 식(1)과 같이 표현될 수 있다.

$$\phi(x, y) = k [z_0 - \Delta z(x, y)] \tag{1}$$

여기서 k는 매질 내에서의 파수(wave number)이고 z₀는 LCD의 최대 두께이며 Δz(x, y)는 각 위치에서 광축과 평행한 방향의 두께 변위이다. 그러므로 이 LCD를 투과한 광은 위치에 따라

$$h(x, y) = |h(x, y)| \exp[j\phi(x, y)] \tag{2}$$

와 같이 변조된다. 여기서 진폭성분 |h(x, y)|는 모든 위치에서 일정하다고 볼 수 있다. 이 LCD가 결합변환 광상관기 또는 vander lugt 광상관기와 같은 광정보처리 시스템의 입력면 또는 주파수 평면에 사용되어질 때 LCD에 입력되는 정보와 h(x, y) (주파수 평면에서는 H(u, v)로 표시함)가 곱해지게 되어 오차를 발생하게 된다. 즉, 입력면에서 사용되었을 때 LCD에 입력신호 f(x, y)를 입력하면 주파수 평면에는

$$\mathcal{F}[f(x, y) h(x, y)] = F(u, v) * H(u, v) \tag{3}$$

와 같은 결과가 발생되어 원하지 않은 왜곡된 출력

을 나타내게 된다. 식(3)에서 *는 convolution 연산을 표시한다. 주파수 평면에서의 사용에서도 입력면에서의 사용때와 같은 결과가 correlation 평면상에 나타나게 되는데 단지 수식적인 표기법이 바뀐다. 즉 식(3)에서 대문자 F, H와 소문자 f, h가 서로 바뀐다.

LCD의 nematic 액정은 양극판에 인가되는 전압에 의해 액정분자의 배열상태가 변하게 되어 복굴절 특성이 바뀌어져서 결과적으로 편광 상태와 위상이 변한다. 사용된 LCD는 90° nematic 구조로서 입력 전압과 analyzer의 각도를 적당히 조절하므로써 이진 위상변조(binary phase modulation)가 가능하다(그림 1(b)). 그래서 LCD는 입력면에 사용시는 이진화된 영상신호의 변조로 이용이 가능하고 주파수 평면에서는 이진 위상필터(binary phase filter)로 이용될 수 있다.⁸⁾

그러므로 LCD의 두께 불균일성 보상은 곧 LCD의 이진 위상변조 특성을 이용하여 h(x, y)의 공액복소값이 되는 h*(x, y)를 이진화한 값이 되도록 각 화소에 전압을 인가함으로써 가능하다. 즉 입력면에서 생각하면 h(x, y) BI {h*(x, y)}가 되고 이것이 푸리에 변환되면 H(u, v) * \mathcal{F}[BI {h*(x, y)}]가 된다. 또 주파수 평면에서 사용되면 마치 이진 위상필터를 사용한 광상관기의 결과와 같이⁹⁾ 중심점에 correlation peak가 발생되어 두께 불균일성이 보상된 결과가 된다.

III. 실험 및 결과

1. LCD의 광학 및 전기-광학적 특성

본 실험에 사용된 액정텔레비전의 LCD는 Epson사의 제품, ET-20으로 화면의 크기는 38.4mm × 28.6mm이며 화소의 크기는 160μm × 130μm, 화소수는 240 × 220개이다. 이 LCD는 특히 화소내에 투명한 TFT(thin film transistor)가 내장되어 액정에 인가된 전압을 한 영상 화면 동안 거의 일정하게 유지하는 특성을 가진 active matrix 형이다.¹⁰⁾ TV영상 표시를 위한 이 LCD는 twisted nematic 액정층을 사이에 두고 양쪽 극판에 전압을 가하므로써 편광방향이 90°까지 회전하게 된다. 따라서 양쪽 편광기를 90°되게 설치하여 광의 강도가 변조되도록 제작되어 있다.

본 연구에서는 LCD를 이진 위상변조가 가능하도록 하기 위하여 analyzer에 해당되는 뒷편 편광기를 제거하여 원하는 각도를 조절할 수 있도록 편광기를 설치하였다. 또한 액정텔레비전을 일부 개조하여 컴퓨터로 계산한 홀로그래 정보 등의 원하는 영상신호를 직접 입력할 수 있도록 영상신호 입력단자를 만들었다. 사용된 컴퓨터는 Hewlett Packard사의 HP9836 마이

크로컴퓨터로서 NTSC 영상신호 발생장치가 있어 240 × 220개의 화소를 갖는 이 LCD에 영상신호가 2:1로 정합되어 각 화소를 정확히 구동할 수가 있다.

LCD를 공간광변조기로 이용하기 위해서 먼저 두께 불균일에 의한 LCD의 공간적 위상변위 특성을 Mach-Zehnder 간섭법을 이용하여 측정하였다. 먼저 LCD를 간섭계에 삽입하지 않은 상태에서 평행한 두 광로를 통과한 광의 출력은 식(4)와 같다.

$$I_0(x, y) = I_1(x, y) + I_2(x, y) + 2\sqrt{I_1(x, y)I_2(x, y)} \cdot \cos[\phi_0(x, y)] \quad (4)$$

여기서 $I_1(x, y)$ 는 측정 대상 광로를 통과한 광의 강도 분포이고 $I_2(x, y)$ 는 기준광로를 통과한 광의 강도 분포이다. $\phi_0(x, y)$ 는 두 광로차에 의한 위상 차이인데 두 평면파의 파면을 일치시키면

$$\phi_0(x, y) = 2n\pi, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (5)$$

가 되어 간섭무늬를 없앨 수 있다. 다음 한쪽 광로에 LCD를 위치시키면 두 빛의 간섭에 의한 빛의 강도 분포는 식(6)과 같다.

$$I_{LCD}(x, y) = I'_1(x, y) + I_2(x, y) + 2\sqrt{I'_1(x, y)I_2(x, y)} \cdot \cos[\phi(x, y)] \quad (6)$$

따라서 결과적인 간섭무늬는 $I'_1(x, y)$ 와 $I_2(x, y)$ 가 같을 경우 LCD의 두께 불균일에 의한 공간적 광위상차에 해당된다. 이상의 방법으로 측정된 LCD의 두께 변위특성은 그림 1(a)와 같다.

다음은 LCD의 전기-광학적 특성, 즉 LCD의 각 화소에 전압을 인가하였을 때 투과된 광의 변조특성을 조사하였다. LCD에 인가되는 전압은 LCD 구동용 집적회로가 너무 소형화되어 있어, 직접 측정이 불가능하여 집적회로 입력단의 영상신호 전압을 기준으로 하였다. 제작된 액정 텔레비전의 영상입력단자를 통하여 LCD의 수평 20개 선에 이진 "1"에 해당되는 전압을 인가하였다. 그때 액정 텔레비전의 영상신호 전압은 "0"에 대해서는 2.4[V], "1"에 대해서는 4.7[V]

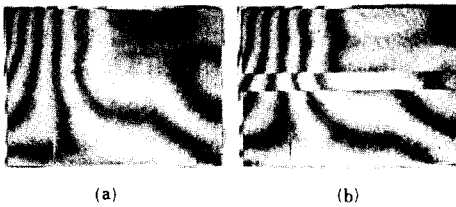


그림 1. (a) LCD의 두께변위에 의한 간섭무늬
(b) 전압 인가에 따른 LCD의 위상변조특성
Fig. 1. (a) Interferogram with LCD in a Mach-Zehnder interferometer.
(b) Phase modulation property of the LCD with applied voltages.

였다. 전압이 인가된 상태에서 analyzer의 각도를 40°로 했을 때 간섭계에서 측정된 간섭무늬는 그림 1(b)와 같다. 전압이 인가된 수평 20개 선에서 위상이 π 만큼 이동된 것으로부터 이 LCD는 이진 위상변조가 가능함을 알 수 있다.

이상에서 측정된 위치에 따른 LCD의 두께변위에 의한 위상변위 정보를 컴퓨터에 입력하고 광학적 실험이 비교적 간편한 결합변환 광상관기의 개념을 적용하여 LCD에 이진 홀로그램을 입력하였을 경우에 대한 컴퓨터 시뮬레이션과 광학적 재생 실험이 수행되었다.

2. 컴퓨터 시뮬레이션

결합변환 광상관기에 LCD를 공간광변조기로 이용할 경우를 가상하면 그림 2와 같이 구성할 수 있을 것이다.

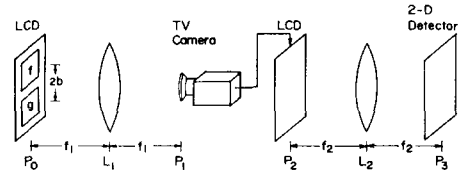


그림 2. LCD를 이용한 결합변환 광상관기의 구성도
Fig. 2. Blockdiagram of a joint transform optical correlator with LCDs.

입력영상 $f(x, y)$ 와 기준영상 $g(x, y)$ 를 2b만큼 떨어지게 나란히 설치하고 평면파를 비추었을 때 P_0 면에서의 빛의 투과는

$$t_1(x, y) = f(x, y - b) + g(x, y + b) \quad (7)$$

가 된다. 렌즈 L_1 에 의해 P_1 면에서 $t_1(x, y)$ 의 푸리에 변환이 형성되고 TV카메라에 의해 푸리에 변환된 광신호의 강도가 검출된다.

$$\begin{aligned} |T_1(u, v)|^2 &= |\mathcal{F}[t_1(x, y)]|^2 \\ &= |F(u, v)|^2 + |G(u, v)|^2 + \\ &\quad F(u, v)G^*(u, v)\exp(-j4\pi v b) + \\ &\quad F^*(u, v)G(u, v)\exp(+j4\pi v b) \end{aligned} \quad (8)$$

이 신호가 다시 P_2 면의 공간광변조기에 입력되고 렌즈 L_2 에 의해 푸리에 변환되면 P_3 면에서 출력은

$$\begin{aligned} t_0(x, y) &= \mathcal{F}[|T_1(u, v)|^2] \\ &= f \star f + g \star g + f \star g \star \delta(y + 2b) + g \star f \star \\ &\quad \delta(y - 2b) \end{aligned} \quad (9)$$

와 같이 된다. 즉, 첫 두항은 각 신호의 자기상관도로 중심점 주변에 생기게 되고 마지막 두항은 y축 방향으로 2b만큼씩 떨어져 상호상관도가 생기게 된다.

이 중에서도 특히 광영상인식에는 세째항의 결과가 주로 이용된다. 그래서 본 연구에서는 실험의 편의상 식(8)까지의 과정은 컴퓨터로 계산하고 식(8)의 세째항만을 P₃면의 LCD에 입력한 경우에 대해 실험하였다.

먼저 LCD에 데이터가 입력되지 않은 상태에서 두께 불균일에 의한 위상변위특성이 이 광상관기에서 나타나는 효과를 시뮬레이션하였다. LCD가 주파수 평면에서 사용되었으므로 위상변위 특성은 $H(u, v) = \exp[j\phi(u, v)]$ 이고 광상관기의 출력은

$$|h_o(x, y)|^2 = |\mathcal{F}^{-1}\{H(u, v)\}|^2 \quad (10)$$

과 같고 이것은 그림 3 (a)와 같다. LCD의 위상변위 $H(u, v)$ 에 대한 보상은 제안된 보상원리에 따라 $H^*(x, y)$ 를 이진화한 데이터를 입력한 경우가 되며 결과는 그림 3 (b)와 같다.

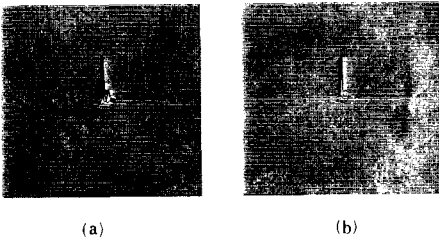


그림 3. 사용된 LCD의 스펙트럼 분포
(a) 두께 불균일성의 보상 전
(b) 두께 불균일성의 보상 후

Fig. 3. Intensity spectrum of the LCD used in the experiment.
(a) before phase compensation.
(b) after phase compensation of thickness nonuniformity.

다음은 LCD에 홀로그램 데이터를 입력한 경우에 대하여 시뮬레이션하였다. 설정된 입력영상과 기준영상은 각각 그림 4 (a) 및 (b)와 같은 문자이다. LCD에 입력되는 신호는 식(8)의 세째항을 이진화한 것이다. 이진화를 하는 것은 LCD의 이진 위상변조 특성을 충분히 이용할 수 있을 뿐 아니라 영상인식에서 보다 우수한 결과를 얻을 수 있기 때문이다.¹⁰⁾ 이것을 식으로 표시하면 다음과 같다.

$$S(u, v) = BI \{F(u, v) G^*(u, v) \exp(-j4\pi v b)\} \\ = \begin{cases} +1, & \text{Re}\{F(u, v) G^*(u, v) \exp(-j4\pi v b)\} \geq 0 \\ -1, & \text{otherwise} \end{cases} \\ = \text{sgn}\{\cos[\phi_r(u, v) - \phi_c(u, v) - 4\pi v b]\} \quad (11)$$

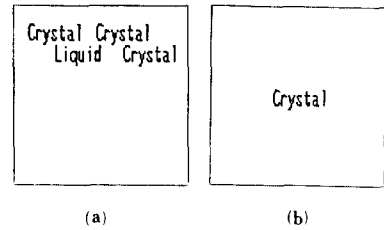


그림 4. 설정된 영상
(a) 입력영상
(b) 기준영상

Fig. 4. (a) input and (b) reference images used in the experiment.

여기서 $BI\{\cdot\}$ 데이터의 이진화를 표시하며, ϕ_r 와 ϕ_c 는 각각 입력영상 및 기준영상의 주파수 평면에서의 위상을 표시한다. LCD의 두께가 균일할 경우 식(11)의 데이터를 LCD에 입력하면 그 출력은 푸리에 변환되어 $R_1(x, y)$ 가 된다.

$$R_1(x, y) = \mathcal{F}^{-1}\{S(u, v)\} \quad (12)$$

LCD의 두께가 균일하지 않은 경우 위상 보상을 하지 않았을 때와 했을 때의 결과를 각각 $R_2(x, y)$ 및 $R_3(x, y)$ 라고 하면 다음과 같다.

$$R_2(x, y) = \mathcal{F}^{-1}\{S(u, v) H(u, v)\} = R_1(x, y) * h_o(x, y) \quad (13)$$

여기서 $h_o(x, y) = \mathcal{F}^{-1}\{H(u, v)\}$ 이다. 위상 보상을 하는 경우에는 LCD에 입력되는 데이터는 $BI\{F(u, v) G^*(u, v) \exp(-j4\pi v b) H^*(u, v)\}$ 가 되는데 이를 $S'(u, v)$ 라 하고 푸리에 변환하였을 때를 $R'_1(x, y)$ 라 하면

$$R_3(x, y) = \mathcal{F}^{-1}\{S'(u, v) H(u, v)\} = R'_1(x, y) * h_o(x, y) \quad (14)$$

가 된다.

이상의 세가지 결과는 P₃면에서 광의 강도 분포로 검출되므로 결과는 $|R_1|^2$ 이 된다. 이 세가지 경우를 컴퓨터로 계산한 결과는 그림 5와 같다.

이와 병행하여 Horner의 정의에 의한 광효율과 신호대잡음비를 계산하였다. 광효율과 신호대잡음비는 다음과 같이 정의된다.¹⁰⁾

$$\eta_H = \frac{\sum_A |U_i|^2}{\sum_{A'} |U_i|^2} \quad (15)$$

$$\text{SNR} = U_{i\text{max}} / \left\{ \sum_{A'} |U_i|^2 / (N_A - N_{A'}) \right\}^{1/2} \quad (16)$$

여기서

- U_i ; correlation 면에서 i번째 화소의 진폭,
- A ; correlation 면의 전체면적,
- A' ; 진폭이 최대진폭의 50% 이상되는 부분의 면적,

$A-A'$; 진폭이 최대진폭의 50% 이하되는 부분의 면적

$N_A - N_A'$; 진폭이 최대진폭의 50% 이하되는 부분의 화소수

이다.

계산된 결과를 요약하면 표 1 과 같다.

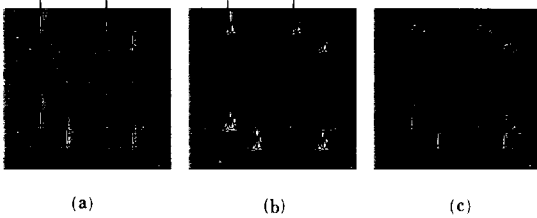


그림 5. 컴퓨터 시뮬레이션 결과
(a) 이상적인 경우
(b) 두께 불균일성을 보상하지 않은 경우
(c) 두께 불균일성을 보정한 경우

Fig. 5. Results of computer simulation
(a) for the uniform LCD.
(b) without phase compensation of not uniform LCD.
(c) with phase compensation of not uniform LCD.

표 1. 광효율과 신호대잡음비의 비교
Table 1. Comparison for light efficiency and SNR.

| | 두께가 균일한 경우 | 두께가 불균일한 경우 | |
|----------|------------|-------------|------|
| | | 보상 전 | 보상 후 |
| η_H | 0.41 | 0.05 | 0.27 |
| SNR | 45.5 | 18.1 | 45.9 |

3. 광학적 재생

앞 절에서 계산된 홀로그램 데이터들을 각각 LCD에 입력하여 광학적으로 재생하였다. 입력광은 He-Ne 레이저를 사용하고 LCD에는 편광기에 의해 0°로 편광된 광이 입사되며 analyzer는 40°로 하였다.

LCD에 위상변위 특성을 고려하지 않은 데이터 $S(u, v)$ 와 고려한 데이터 $S'(u, v)$ 를 각각 입력하여 재생된 결과는 그림 6에 보이는 바와 같다. LCD의 주기적인 화소 배열에 의한 회절패턴이 중심점, 상하 및 좌우에 나타나는데 상하 및 좌우의 것은 그림 6의 바깥 부분에 나타나 여기서는 표시되지 않았다.

IV. 고 찰

LCD의 두께불균일성을 보상하기 위한 실험에서 그

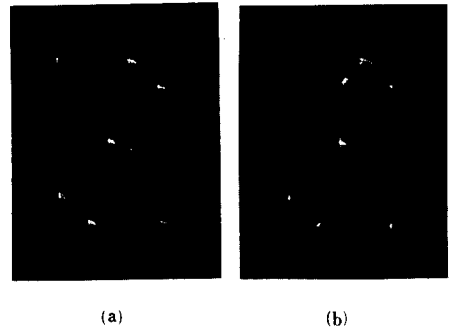


그림 6. LCD에 입력된 홀로그램의 광학적 재생
(a) 위상 보상이 되지 않은 경우
(b) 된 경우

Fig. 6. Optical reconstruction of holograms on the LCD.
(a) without.
(b) with phase compensation.

림 3에서 보는 바와 같이 $BI\{H^*(u, v)\}$ 를 입력한 경우 correlation면에서 중심점에 보다 첨예한 출력이 생김으로 보상이 가능한 것이 확인된다. 이 방법은 이진 위상필터를 이용한 광상관기의 원리와 같은 것이다. 결합변환 광상관기에 응용을 가상하여 수행한 컴퓨터 시뮬레이션에서 그림 5와 같이 원점에 대해 자기상관도 peak가 대칭으로 나타나는 것은 홀로그램 데이터를 이진화하였기 때문에 나타난다. 더우기 이진화 과정은 실수값을 만들기 때문에 결과는 Hermitian symmetry의 출력이 P₂면에 생겨 서로 대칭되는 점에서의 진폭과 위상은 각각 우함수 및 기함수인 관계에 있다. 따라서 $h_o(x, y)$ 와 correlation되면 한 쪽면의 correlation peak는 개선되는 반면 반대편 면의 peak는 오히려 분산되는 결과가 나타난다고 생각된다. 광학적 재생의 결과도 이상에서 계산된 결과와 일치하는 것이 확인되었다. 또한 표 1에 요약된 광효율 및 신호대잡음비의 비교에서도 위상보상이 된 경우, 보다 개선된 결과를 얻었다.

V. 결 론

이상의 각종 컴퓨터 시뮬레이션과 LCD에 데이터를 입력하여 광학적 재생을 한 결과 LCD의 두께변위에 의한 위상변위특성은 기발표된 다른 방식에 비해 하드웨어상의 아무런 변화없이 소프트웨어적으로 용이하게 보상이 가능하다. 또한 LCD가 결합변환 광상관기에 응용될 경우 실시간 처리까지 가능한 시스템이 구성될 수 있으며 Vander lugt 광상관기에서도 이 개념은 그대로 적용이 가능하여 두께불균일성이 있는

LCD를 공간광변조기로 활용이 가능함을 알 수 있다.

사용된 액정텔레비전은 대부분 초소형 소자 및 집적회로로 제작되어 있고 내부회로를 입수할 수 없어 용도에 맞춰 개조하기가 곤란한 단점이 있으며 LCD에 직접 인가되는 전압 등의 측정이 불가능하여 LCD 자체의 특성 연구가 어려운 점이 있다.

LCD 내에서 일어나는 전광특성, 즉 인가전압에 따른 편광특성과 위상변조에 대한 성질이 좀 더 연구되면 보다 융통성있게 공간광변조기로서 각종 광정보처리에 이용될 것으로 기대된다.

參 考 文 獻

- [1] A.M. Tai, "Low-cost LCD spatial light modulator with high optical quality," *Appl. Opt.* vol. 25, no. 9, pp. 1380-1382, May 1986.
- [2] D. Casasent and S.F. Xia, "Phase correction of light modulators," *Opt. Lett.* vol. 11, no. 6, pp. 398-400, Jun. 1986.
- [3] M. Young, "Low-cost LCD video display for optical processing," *Appl. Opt.*, vol. 25, no. 7, pp. 1024-1026, Apr. 1986.
- [4] 정신일, 김홍만, 정재우, 강민호, "액정텔레비전을 이용한 공간적 광변조 특성," 대한전자공학회 하계종합학술대회 논문집, vol. 9, no. 1, pp. 562-564, Jun. 1986.
- [5] C.S. Weaver and J.W. Goodman, "A technique for optical convolving two function," *Appl. Opt.* vol. 5, no. 7, pp. 1248-1249, Jul. 1966.
- [6] J.E. Rau, "Detection of differences in real distributions," *J.O.S.A.*, vol. 56, no. 11, pp. 1490-1494, Nov. 1966.
- [7] J.E. Rau, "Real-time complex spatial modulation," *J.O.S.A.* vol. 57, no. 6, pp. 798-802, Jun. 1967.
- [8] D. Psaltis, E.G. Pack and S.S. Venkatesh, "Optical image correlation with a binary spatial light modulator," *Opt. Eng.*, vol. 23, no. 6, pp. 698-704, Dec. 1984.
- [9] J. Horner and H. Bartelt, "Two bit correlation," *Appl. Opt.*, vol. 24, no. 18, pp. 2889-2893, Sep. 1985.
- [10] H. Bartelt and J. Horner, "Improving bi-phase correlation filters using iterative techniques," *Appl. Opt.*, vol. 24, no. 18, pp. 2894-2897, Sep. 1985.
- [11] S. Morozumi, K. Oguchi and H. Ohshima, "Latest developments in liquid crystal television displays," *Opt. Eng.*, vol. 23, no. 3, pp. 241-246, May/June. 1984.