論文 13-4-32

개인 인증을 위한 체적 홀로그래픽 지문인식 시스템

Volume Holographic Fingerprint Recognition System for Personal Identification

이 승 현*

Seung-Hyun Lee

(1998년 7월 6일 접수, 1998년 11월 3일 채택)

ABSTRACT

In this paper, we propose a volume holographic fingerprint recognition system based on optical correlator for personal identification. Optical correlator has high speed and parallel processing characteristics of optics. Matched filters are recorded into a volume hologram that can store data with high density, transfer them with high speed, and select a randomly chosen data element. The multiple reference images of database are prerecorded in a photorefractive crystal in the form of Fourier transform images, simply by passing the image displayed in a spatial light modulator through a Fourier transform lens. The angular multiplexing method for multiple holograms of database can be achieved by rotating the crystal by use of a step motor. Experimental results show that the proposed system can be used for the security verification system.

1. 서 론

정보화 사회의 발달에 따라 개인 정보 관리에 대한 관심이 급속히 증가하고, 자동화 장치나 보안을 목적으로 하는 많은 분야에서 전기전자적인 장치를 이용한 과학적인 개인 식별을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 개인 인증 시스템에서 개인을 식별하는 방법은 선천적인 신체적 고유특성과 오랜 기간에 걸쳐 습관화되어 재현성의 정확도가 증가한 정보 그리고 인위적으로 구성한 개인정보 등을 들 수 있다. 그러나, 인위적으로 구성하는 개인 정보는 훼손, 도난, 위조 등으로 관리가 어려움이 있으므로 개인을 확인하는 수단은 선천적으로 지닌 특성을 이용하

* 광운대학교 전자공학과

는 것이 효과적이다. 지문은 유일성과 불변성으로 가장 효율적인 개인 인증 수단으로 인식되고 있다. 그러나, 지문 영상의 특징은 개인간에 명백한 영상차이가 존재하는 반면에 좁은 영역에 많은 정보들이 집중되어 있고, 외형적으로 유사하게 나타날지라도 규격화된 패턴이 아닌 자연계로부터 다양하게 입력된 랜덤한 정보를 포함하고 있다. 따라서, 기존의 디지털 시스템을 이용하여 영상 분류 및 정합을 시도하기에는 시스템이 지나치게 복잡하게 되거나 처리 시간이 과도하게 되어 실질적인 응용이 제한되고 있다 [1,2]. 광상관기술은 광정보처리의 가장 중요한 기능중의 하나로 패턴 및 문자 인식, 영상처리, 연상메모리, 광컴퓨팅등 광범위한 응용 분야를 가지고 있다. 상관 기술은 두 개의 서로 다른 영상의 퓨리에 스펙트럼을 서로 곱한 후, 이들 곱의 결과를 다시 역 퓨리에 변환하는 방법으로 두 영상 사이의 상관도를 쉽게 얻는 방법이다. 대부분 기존의 상관기술은 두 영상을 디지털화 한 후 최적의 정합관계를 얻기 위해 복잡한 알고리즘을 사용하게 되므로 대용량의 메모리와 과다한 처리 시간이 요구되어 속도와 용량에 제한을 받게되는 단점을 지닌다. 이와 같이 기존 상관기의 문제점으로 대두되고 있는 속도와 메모리 용량의 문제를 해결할 수 있는 방법은 Vander Lugt 광상관기[3]나 광 JTC(joint transform correlator)[2,4]와 같은 광상관기에 대용량 광메모리[5,6]를 데이터 베이스로 활용하는 시스템을 구성하는 것이라 할 수 있다.

본 논문에서는 공간정합필터의 데이터 베이스로써 체적 홀로그램을 이용한 VanderLugt 상관기를 구성하였다. 체적홀로그램을 이용한 광상관시스템은 광학의 고속 및 병렬처리 특징을 지니며 방대한 저장 능력과 실시간 랜덤 엑세스의 장점을 갖는다. 데이터 베이스로 사용되는 영상들은 각각 공간광변조기에 디스플레이 되어 퓨리에 변환 렌즈를 통과한 후 퓨리에 변환된 형태로 평면파인 기준파와 간섭되어 광굴절매질에 기록된다. 대용량의 데이터 베이스를 구성하기 위한 다중화 방법으로 광굴절 매질을 회전하여 기록하는 각다중화 기술을 사용하였다. 광굴절 매질의 회전과 기준 영상의 update, 그리고 기록을 위한 노출시간은 프로그램을 통하여 자동적으로 처리되며, 저장된 데이터는 보존을 위해 fixing 과정을 거치게 된다. 입력 영상의 퓨리에 변환을 이용하여 광굴절매질에 저장되어 있는 퓨리에 홀로그램이 재생되게 되는데, 단지 입력과 저장된 홀로그램이 일치하는 경우의 각도에서만 두 스펙트럼의 곱이 재생되게 된다. 이 스펙트럼의 곱은 다시 렌즈에 의해 퓨리에 변환되며 원래 두 영상에 대한 상관 출력의 형태로 나타나게 된다. 광상관 시스템의 데이터 베이스를 구성하기 위해 여러 종류의 지문 영상을 사용하였으며, 시스템 구성 및 실험을 통하여 본 체적홀로그램 상관 시스템의 개인인증 시스템 응용 가능성을 제시하였다.

2. 개인 인증을 위한 광상관기 시스템

광상관기는 여러 가지 정보가 섞여 있을 때 원하는 정보에 대한 정합 필터를 사용하여 영상정보 처리하므로써 그 정보가 있는 부분만이 상관 값인 밝은 점으로 표시되게 하는 광학시스템이다. 이러한 광패턴인식 기술은 1963년 Vander Lugt가 가간섭성 광인 레이저를 이용하여 광영상의 진폭과 위상 정보를 동시에 기록한 홀로그래픽 공간정합필터 제작 방식을 제시하므로써 시작되었다. 광상관기를 이용하므로 임의의 2차원 분포를 갖는 입력 영상에 대해서 공간정합필터에 기록된 영상과의 상관 정도를 쉽게 찾아낼 수 있다. 또한, 입력 영상의 변위에 무관하게 밝은 상관 첨두치를 출력면에 나타내므로 입력 영상 내에서 찾고자 하는 영상의 유무와 위치에 대한 정보를 알 수 있다[7].

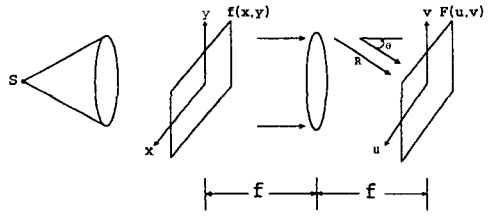


Fig. 1 System diagram for construction of a complex spatial filter

공간정합필터는 Fig. 1에서와 같이 입력 영상 패턴 f(x, y)의 퓨리에 변환 홀로그램을 이용하므로써 구성할 수 있다. 입력 f(x, y)와 기준 평면파 R 간의 간섭 후 공간주파수 평면에서 광의 분포 E(u, v)는 식(1)과 같으며, 광세기 분포는 식(2)와 같다.

$$E(u,v)=F(u,v)+\exp(j\alpha_o u) \quad \cdots\cdots (1)$$

여기서, $\alpha_o = f\sin\theta$, f는 렌즈의 초점거리, 그리고 $F(u,v)=|F(u,v)|\exp\{-j\Phi(u,v)\}$이며 x, y는 입출력 공간좌표, u, v는 주파수 평면 공간좌표를 나타낸다.

$$I(u,v)=1+|F(u,v)|^2 +2|F(u,v)|\cos[\alpha_o u+\Phi(u,v)] \quad \cdots\cdots (2)$$

Fig. 2는 2차원 영상 정보 처리를 위한 전형적인 광정보처리 시스템 구성도로써 P_1, P_2, P_3는 입력, 퓨리에, 출력 평면을 각각 나타낸다. 식(2)와 같은 복소공간필터를 필터 평면에 위치시킨 후 공간필터 평면을 통과한 광의 분포는 식(3)과 같이 주어진다.

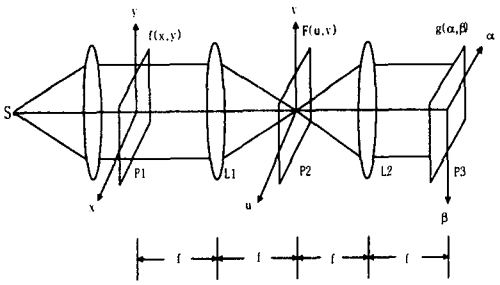


Fig. 2 A coherent optical matched filtering system

$$E(u,v)=F(u,v)H(u,v) =F(u,v)+F(u,v)\,|F(u,v)|^2 +F(u,v)F(u,v)\exp(ju\alpha_o) +F(u,v)F^*(u,v)\exp(-ju\alpha_o) \quad \cdots\cdots (3)$$

결과적으로 렌즈 L_2를 통과한 후 출력평면 P_3에서 광의 분포는 식(4)와 같이 나타나게 된다.

$$g(\alpha,\beta)=\int\int E(u,v)\exp[-j(\alpha u+\beta v)]dudv$$
$$=f(x,y)+f(x,y)*f(x,y)*f^*(-x,-y) +f(x,y)*f(x+\alpha_0,y) +f(x,y)*f^*(-x+\alpha_0,-y) \quad \cdots\cdots (4)$$

식(4)에서 처음과 두 번째 항은 출력평면의 원점에 나타나는 0차 회절 성분이고, 세 번째 항은 $\alpha=\alpha_0$에 나타나는 컨볼루션 결과를 나타낸다. 광상관기의 출력으로 사용되는 상관 출력은 네 번째항 이며 $\alpha=-\alpha_0$에 나타나게 된다.

3. 체적홀로그래픽 광상관 시스템

체적 홀로그램에 대용량의 공간정합 필터를 저장하기 위한 방법으로 다중화 기술을 사용할 수 있다. 다중화 방법으로는 간섭파 간의 각도, 파장, 위상의 변화를 이용하는 각다중화, 파장다중화, 위상부호 다중화 기법 및 공간 다중화 기법등이 제안되고 있다[8,9].

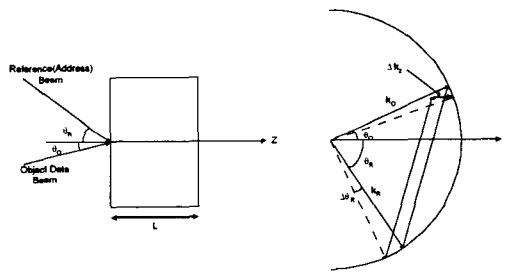


Fig. 3 Simple sinusoidal hologram geometry
(a) volume interaction geometry
(b) wave vector space description of holographic interaction

각 다중화는 특정한 사잇각을 갖는 물체파와 기준파로 기록된 체적 홀로그램이 기록시의 기준파와 복원시의 기준파 사이의 각도에 강하게 의존하여 복원된다는 Bragg 매칭 조건에 기초한다. 각 선택도는 Fig. 3(a)와 같이 두 개의 평면파에 의해 기록된 간단한 정현파 형태의 격자의 경우에 대해 가장 잘 설명되고 정량화될 수 있다. 여기서, 홀로그램 매질(두께 L_z) 내에서 측정된 기준파와 물체파의 입사각은 각각 θ_R과 θ_O이며, 기준파와 물체파의 파벡터는 식(5)와 같이 주어진다.

$$\mathbf{k}_R = k_0(-\sin\theta_R\hat{x} + \cos\theta_R\hat{z})$$

$$\mathbf{k}_O = k_0(-\sin\theta_O\hat{x} + \cos\theta_O\hat{z}),\ k_0 = \frac{2\pi n}{\lambda} \quad \cdots\cdots (5)$$

여기서, n은 매질의 굴절률, λ는 진공 내에서의 빛의 파장을 나타낸다. Fig. 3(b)의 파벡터 공간도형에서 격자벡터 **K**는 매질 내에서 진행하는 평면파에 대응하는 모든 가능한 파벡터 **k**의 집합을 나타낸다. 간략화를 위해 표면의 반지름이 k_0인 등방성인 구의 경우만을 고려한다.

입력 기준파가 회절을 일으키기 위해 만족되어야 할 브래그 매칭 조건은 식(6)과 같다.

$$|\mathbf{k}_0'| = |\mathbf{k}_R' + \mathbf{K} + \hat{z}\Delta k_z| = k_0 \quad \cdots\cdots (6)$$

여기서, $\mathbf{k}_0'$, $\mathbf{k}_R'$는 물체파 벡터와 입사된 기준파 벡터를 나타내며, 기준파 벡터는 기록 시와 거의 같게 조절된다. Δk_z는 매질의 두께 때문에 어느 정도 발생될 수 있는 위상 불일치를 나타내며 약한 산란의 경우에(회절효율 $\eta \ll 1$) 회절효율은 식(7)과 같이 주어진다.

$$\eta \propto \sin c^2(\Delta k_z L_z) \quad \cdots\cdots (7)$$

따라서, 정보를 읽어내는 동안 기준파의 방향은 식(8)로 정의되는 영역 내에 있어야 충분히 관측될 수 있는 회절을 얻을 수 있다.

$$|\Delta k_z| \le \frac{\pi}{L_z} \quad \cdots\cdots (8)$$

입사되는 기준파의 각도를 기록할 때의 각도와 동조시키기 위한 각도의 방향에 대한 위상불일치는 비등방성의 특징을 갖는다. 왜냐하면 Fig. 3(b)에서 처럼 기준벡터는 위상불일치가 0인 Bragg조건을 만족하는 $\mathbf{k}_R$과 $\mathbf{k}_O$에 의해 정의되는 평면에 수직인 방향으로 회전될 수 있고, 평면에서의 회전이 증가함에 따라 발생되는 위상 불일치 또한 증가하기 때문이다.

평면에서의 각 선택도는 근사적으로 식(7)에서 처음으로 0이 발생하는 지점사이의 각도의 폭으로 주어진다.

$$\Delta\theta_R = \frac{\lambda\cos\theta_O}{nL_z\sin(\theta_R + \theta_O)} \quad \cdots\cdots (9)$$

각의 선택도는 물체파와 기준파의 각도($\theta_R + \theta_O$)가 90도일 때 가장 우수하고 이 각도를 중심으로 각 선택도는 대칭적으로 떨어지기 시작한다. 같은 체적 내에 다중 홀로그램을 저장하기 위하여 식(9)로 주어지는 각 증가분 만큼 간격을 둔 기준 빔들을 이용하여 동일평면에 다중화시켜서 복원하면 cross talk가 없는 재생영상을 얻을 수 있다. 기준파의 각도 θ_1에서 θ_m까지의 주어진 범위 내에 다중화될 수 있는 홀로그램의 수는 근사적으로 식(10)과 같이 주어진다[10].

$$M \approx 1 + \frac{nL_z}{\lambda}|\cos\theta_1 - \cos\theta_m| \quad \cdots\cdots (10)$$

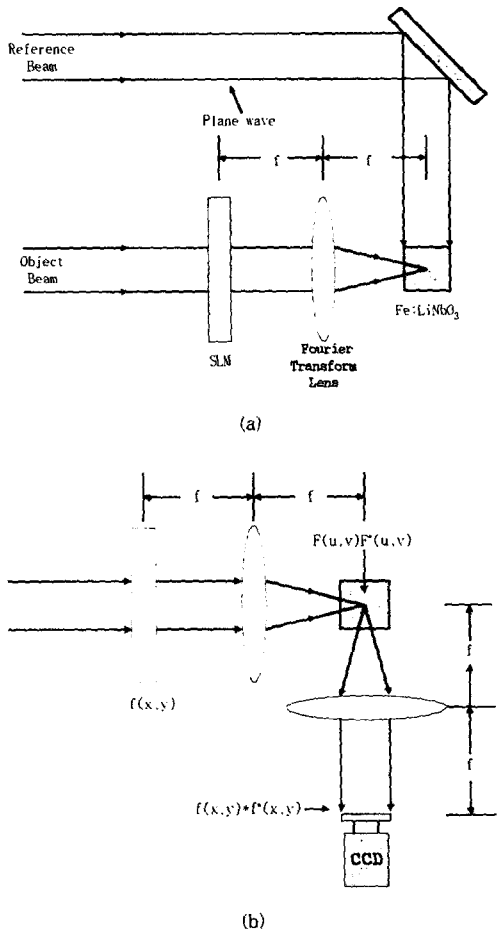


Fig. 4 Recording and readout operation of spatial matched filter (a)recording (b)readout

4. 시스템 구성 및 실험

본 논문에서는 공간정합필터의 데이터 베이스로써 체적 홀로그램을 이용한 VanderLugt 상관기를 구성하였다. 데이터 베이스로 사용되는 공간정합필터들의 기록을 위한 블럭도는 Fig. 4(a)와 같다. 공간광변조기에 디스플레이된 영상은 퓨리에 변환 렌즈를 통과한 후 퓨리에 변환된 형태로 평면파인 기준파와 간섭되어 광굴절 매질에 기록된다.

대용량의 데이터 베이스를 구성하기 위해 광굴절 매질을 회전시키면서 물체파와 기준파의 변화된 각도마다 다른 영상을 디스플레이 하여 정합필터의 데이터베이스 홀로그램을 저장하였다[11]. 즉, 본 실험에서는 광굴절 매질을 회전시키는 방법으로 각다중화를 구현하였기 때문에 상관 출력이 항상 일정한 위치에 나타나게 된다. 상관 피크 값이 발생한 경우, 회전 위치를 파악하므로써 입력 지문의 신원을 알 수 있다. Fig. 4(b)는 상관 출력을 얻는 홀로그램의 재생 과정에 대한 블럭도이다. 입력 영상의 상관 출력은 입력의 퓨리에 변환을 이용하여 광굴절매질에 저장되어 있는 공간정합필터 성분인 퓨리에 홀로그램을 재생하므로써 얻을 수 있게 된다. 즉, 퓨리에 변환된 입력과 저장된 홀로그램이 일치하는 경우에 대한 기준파의 각도에 대해서만 두 스펙트럼의 곱이 재생되고, 이 스펙트럼의 곱은 다시 렌즈에 의해 퓨리에 변환되어 두 영상에 대한 상관 출력의 형태로 나타나게 된다. Fig. 5는 체적홀로그래픽 광상관 시스템도를 나타낸 것이다. 광굴절 매질을 회전하는 각다중화 방식을 사용하여 20개의 지문 영상을 체적홀로그램의 데이터 베이스로 구성하고, 임의 입력에 대한 상관 실험을 통하여 시스템의 성능을 평가하였다. 사용된 컴퓨터 시스템은 Pentuim 166 MHz이고 LCD에 디스플레이 하기 위해 사용한 이미지 그레버는 Data Translation사의 DT2851을 사용하였다. 데이터 영상을 디스플레이 하기 위해 사용된 LCD는 640×480 화소를 갖는 EPSON사의 LC-SLM(모델: P13VM215)으로써 3개의 LCD(Red, Green, Blue 패널)로 구성되어 있으며, 비디오 카메라를 통하여 아날로그 영상을 나타낼 수 있고 프레임 그래버를 이용하여 컴퓨터와 인터페이스를 취함으로써 디지털 입력 영상을 디스플레이 할 수 있다. 광원으로는 532 nm 의 100 mW Nd-YAG 레이저를 사용하였다. 데이터 베이스로 사용된 광굴절매질로는 Fe-Doped 0.03%, 10 mm Cube LiNbO3를 이용하였다.

공간정합 필터를 홀로그램으로 기록하는 순서는 다음과 같다. 먼저, 레이저로부터 방출된 빔은 공간필터를 거친 후 렌즈를 이용하여 평행파로 구성되어 빔 분할기에 의해 물체파와 기준파로 분리된다. 물체파는 SLM소자인 LCD에 디스플레이 되어있는 영상을 지나 변조된 뒤 퓨리에 변환 렌즈를 이용하여 공간정합필터로 구성된다. 공간주파수 평면에 위치하는 필터 성분은 기준파와 간섭을 일으키게 되며, 이 간섭패턴은 체적홀로그램에 기록되게 되어 정합필터의 역할을 하게 된다. 기록에 사용될 매질은 효율을 최대화 하기 위해 160℃에 30분 정도 가열하므로써 잔여 기록 데이터를 모두 지워서 사용하였다. 다중화 방법으로 각다중화를 사용하였으며, 시스템은 스텝 모터를 사용하여 광굴절 매질을 제어하도록 되어있다. 스텝 모터는 광굴절 매질을 $\Delta\theta$ 간격으로 회전시키며, 이는 기준파와 물체파와의 각도를 변화시키는 것과 동일한 효과로써 입력 영상에 따른 정합필터 홀로그램을 매질에 기록하게 된다. 기록을 완전히 끝낸 후에는 데이터의 안전한 저장을 위해 130℃ 정도의 온도에서 thermal fixing을 이용하여 고정을 하였다. Fig. 6는 저장된 20개의 지문 영상 중에서 4개의 지문을 보여준다.

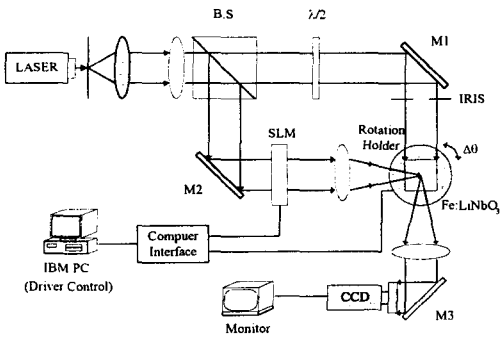


Fig. 5 An optical correlator system utilizing hologram memory

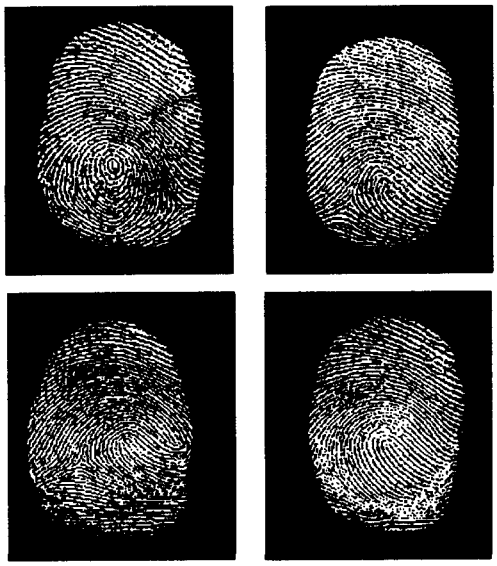


Fig. 6 Four fingerprint images from the database of 20 fingerprints

입력 영상에 대한 상관 출력은 Fig. 5의 시스템에서 기준파를 아이리스로 차단한 뒤 입력 영상을 LCD에 디스플레이 하고 광굴절 매질을 회전함으로써 얻어질 수 있다. 즉, 광굴절매질에 저장되어 있는 대용량의 퓨리에 홀로그램들 중에서 입력과 저장된 홀로그램이 일치하는 경우의 각도에서만 두 스펙트럼의 곱이 재생되고 다시 렌즈에 의해 퓨리에 변환되어 원래 두 영상에 대한 상관 출력의 형태인 밝은 점으로 나타나게 된다. 상관 피크 값이 출력되는 경우는 입력지문과 데이터 베이스의 지문이 일치하는 경우에 해당하며 스텝 모터의 회전 위치를 구함으로써 신원을 파악할 수 있게된다. 이와같이 상관 피크 값이 발생하였을 때의 스텝 모터에 대한 회전위치를 파악하므로써 입력 영상의 신원을 분석할 수 있다. Fig. 7은 데이터베이스에 기록된 10번째 지문 영상을 입력시키고 기준파를 차단한 후 광굴절 매질을 회전 시켰을 때, 각각의 각도에 대한 입력과의 상관 값을 정규화한 그래프이다. Fig. 8(a)는 데이터 베이스의 10번째 지문 영상인 입력 지문이며, 광굴절매질의 회전 각도가 기록시의 각도와 일치하였을 때의 상관 결과를 Fig. 8(b)에 보여준다. 실험을 통해 본 시스템이 효과적인 안전 검증 시스템으로 응용이 가능한 상관 시스템으로 동작할 수 있는 가능성을 보였으며, 왜곡 가능한 모든 경우의 영상을 데이터 베이스로 구성하는 방법으로 동일인의 왜곡된 지문에 강건한 인식 성능을 가질 수 있음을 제시하였다.

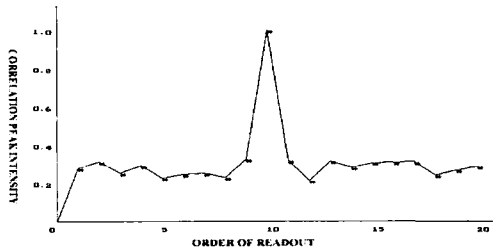
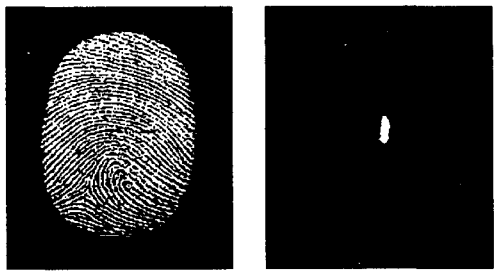
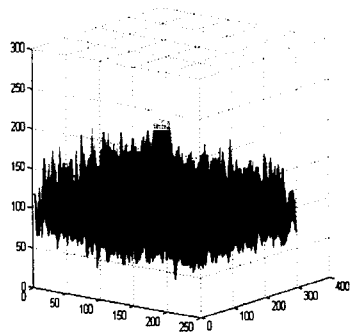


Fig. 7 Normalized correlation peak intensities as to 10th fingerprint image



(a)



(b)

Fig. 8 Output of the correlator
(a) input fingerprint (b) correlation peak

광굴절매질에 여러 개의 데이터를 기록하기

위해서는 데이터를 기록하는 동안 그전에 기록한 데이터가 지워지는 것을 감안하여 기록순서에 따른 기록시간을 달리 해 줘야 한다. 즉, 기록할 데이터의 개수와 기록시간, 그리고 삭제시간을 이용하여 기록시간을 산출해야 한다. 데이터를 광굴절매질에 기록할 때 고려해야 할 사항으로는 기록순서에 따른 기록시간 산출, 각각의 데이터에 따른 스텝모터의 제어, 그리고 기록할 데이터를 LCD에 전송하는 것으로 분류할 수 있다. 본 실험에서는 이 3가지를 프로그램으로 온라인화 하여 하나의 자동화 시스템으로 구현하였다. 먼저 프로그램에 기록할 데이터의 개수와 기록시간, 삭제시간을 입력하여 컴퓨터의 메모리에 기록할 데이터를 저장해 둔 다음 실행을 시키면, 데이터들의 기록순서에 따른 기록시간이 자동적으로 산출되어 초기 데이터를 LCD에 전송한 뒤 기록시간 동안 LCD를 투과하여 변조된 목적파와 기준파의 간섭패턴이 광굴절매질에 기록된다. 초기 기록이 완료되면 스텝모터를 한 스텝 회전시켜 광굴절 매질을 회전시킨다. 다음, 데이터를 LCD에 전송한 후 다음의 기록시간에 따라 기록을 한 뒤 이를 반복하며 데이터를 저장한다. 이와 같이 광굴절매질을 제어하는 방법으로 각다중화를 이용하고 기록순서에 따라 기록시간을 산출하는 프로그램을 이용하며, LCD에 데이터를 전송하는 프로그램, 마지막으로 이들 각각의 모듈을 통합하여 하나의 자동화 시스템을 구현하므로써 방대한 데이터를 균일한 회절효율을 가질 수 있도록 자동으로 기록을 할 수가 있었다. 본 논문에서는 공간정합필터의 데이터 베이스로 20개의 영상을 각각 LCD에 디스플레이하며 기록시간 스케줄에 따라 노출시간을 조절하였다. 저장순서에 따른 기록시간을 Fig. 9에 나타내었다.

5. 결 론

본 논문에서는 공간정합필터의 데이터 베이스로써 체적 홀로그램을 이용한 광상관기 시스템을 이용하여 입력된 지문을 인증할 수 있는 안전검증 시스템을 구성하였다. 데이터 베이스로 사용되는 지문의 공간정합필터들은 각다중화 방

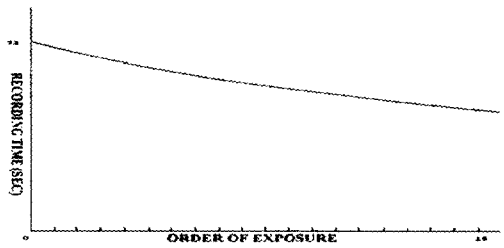


Fig. 9 Recording time schedule

식을 사용하여 체적 홀로그램에 저장하였다. 검색하고자 하는 입력 지문을 공간광변조기에 디스플레이하고, 광굴절 매질을 회전하여 입력 지문과 데이터베이스의 상관 결과를 얻을 수 있으며, 이때 매질의 회전 위치를 파악하므로써 입력된 지문의 신원을 파악할 수 있다. 본 시스템은 대용량 데이터 베이스 및 실시간 처리의 필요성을 지니는 안전검증 시스템 등에 강력한 장점을 제공하며, 왜곡 가능한 모든 경우의 지문 영상을 데이터 베이스로 기록하거나 스마트 필터등의 전처리 시스템을 추가함으로써 왜곡 불변 안전검증 시스템으로의 응용도 가능하다.

참 고 문 헌

1) M.Eleccion, "Automatic fingerprint identification", IEEE Spectrum, pp. 36~45, 1973.
2) S.H.Lee, S.Y.Yi, and E.S.Kim, "Optical fingerprint identification based on binary extraction joint transform correlator", Proc. SPIE, Vol. 2752, pp. 224~232, 1996.
3) A.VanderLugt, "Signal detection by complex spatial filtering", IEEE Trans. Infor. Theory, Vol. IT-10, pp. 139~145, 1964.
4) C.S.Weaver and J.W.Goodman, "A technique for optically convolving two functions", Appl. Opt., Vol. 5, No. 9, pp. 1248~1249, 1966.
5) J.P.VanHeerden, "Theory of optical information storage in solids", Appl. Opt. Vol. 2, pp. 393~400, 1963.
6) F.H. Mok, M.C. Tackitt, and H.M. Stroll, "Storage of 500 high resolution holograms

in a LiNbO3 crystal", Opt. Lett., Vol. 16, pp. 605~607, 1992.
7) F.T.S. Yu and I.C. Khoo, Principles of Optical Engineering, John Wiley & Sons, 1990.
8) F.Mok, "Angle-multiplexed storage of 5000 holograms in lithium niobate", Opt. Lett., Vol. 18, pp. 915~917, 1993.
9) J.H. Hong, I. McMichael, T.Y. Chang, W. Christian, and E.G. Paek "Volume holographic memory systems : techniques and architectures", Opt. Eng., Vol. 34, No. 8, pp. 2193~2203. 1995.
10) H.Y. Li and D. Psaltis, "Three-dimensional holographic disks", Appl. Opt. Vol. 33, pp. 3764~3774, 1994.
11) S.H. Lee and E.S. Kim, "Stereoscopic display based on a volume holographic storage", Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 37, No. 10B, pp. L1193~L1194, 1998.