

## 시각모델에 근거를 둔 반복처리에 의한 디지털 하프톤 기법

正會員 李泰鴻\*, 李東園\*\*

### Digital Halftoning by an Iterative Procedure based on a Human Visual Model

Tae Hong Lee\*, Dong Won Lee\*\* Regular Members

#### 要 約

인간의 제한된 공간주파수응답특성으로 인해 점으로 구성된 패턴을 적정 거리에서 관측하면 마치 계조도를 가진 영상처럼 보인다. 디지털 하프톤 기법은 그런 인간의 시각현상을 이용하여 프린터, 팩시밀리, 액정 TV 등과 같은 이진출력 장치를 통해 연속계조도영상과 시각적으로 유사한 이진영상(하프톤 영상)을 얻는 것을 목적으로 한다.

기존의 디지털 하프톤 방법中에서 대표적인 두 방법은 순차적 디더법과 오차확산법으로서, 순차적 디더법은 알고리즘의 구조가 단순하고 처리시간이 짧은 반면, 눈에 거슬리는 규칙적인 무늬가 보이고 공간해상도가 낮다. 한편, 오차확산법은 공간해상도가 우수한 반면 알고리즘에 기인한 여러 인공잡음들이 보인다.

본 논문에서는 인간의 시각모델에 근거한 반복 디지털 하프톤 방법을 제안하여 시각적으로 최적인 하프톤 영상을 얻었다.

제안된 방법을 통해 얻어진 하프톤 영상은 기존의 방법들을 통해 얻은 하프톤 영상보다 인공잡음들이 감소하였으며 동시에 공간해상도 또한 향상되었다.

#### ABSTRACT

Because of the limited spatial frequency response characteristics of the human visual system, when the pattern consisted of dots is viewed from appropriate distance, it is seen as a continuous gray-level image. Using this visual phenomenon, digital halftoning is to obtain a binary image (halftone image) visually similar to continuous gray-level image through the binary output devices such as a printer, facsimile, LCD TV, etc.

The two widely used halftone methods are the ordered dither method and the error diffusion method. The ordered dither method has a simple structure and is computationally fast method, but has low spatial resolution and displays visually-annoying periodic artifacts in the halftone image. On the other hand, the error diffusion method has high spatial resolution, but displays artifacts due

\*영남대학교 전자공학과

\*\*팩스트시스템(주) 기술연구소

論文番號 : 94369

接受日字 : 1994年 12月 27日

to the algorithm to be processed.

In this paper, in order to obtain a visually-optimal halftone image, an iterative digital halftoning based on a human visual model is presented.

Halftone images by the proposed method display little artifacts, and at the same time have high spatial resolution when they are compared with those by ordered dither and error diffusion methods.

## 1. 서 론

현존하는 모든 인쇄장치와 일부 영상표시장치는 본질적으로 on/off의 이진출력만을 수행하는 이진출력장치이다.

디지털 하프톤 기법(Digital Halftoning)은 이진출력장치를 거쳐 나온 이진영상(이하, 하프톤 영상)에 대해, 연속계조도(continuous gray-level)영상과 같은 시각효과를 갖도록 하는 비선형 영상처리기법의 일종이다. 다시 말해, 인간의 시각체계가 제한된 공간주파수 응답특성을 가짐으로 인해 점의 행렬로 구성된 패턴을 적정 거리에서 관측할 경우 마치 연속계조도를 가진 영상처럼 보이게 되는 현상을 이용한 학문이다.

최근 들어, 레이저 프린터, 팩스밀리, 전자출판(DTP)시스템 등과 같은 고해상도를 지원하는 이진(인쇄)출력장치의 급격한 확산으로 말미암아 고화질의 하프톤 영상을 얻기 위한 노력과 그에 대한 관심이 날로 고조되고 있는 실정이다. 현재 널리 시판되고 있는, 적당한 해상도(300~600dpi)의 프린터로써 적절한 디지털 하프톤 기법을 이용하여 고화질의 영상을 인쇄할 수 있다면 경제적 측면에서 그 효용가치가 크며 더 나아가, 전자출판업계의 발전에도 도움이 될 것이다.

구미 각국에서는 디지털 하프톤 기법에 대한 연구와 개발이 컴퓨터의 발달과 더불어 과거 30여년동안 꾸준히 진행되어 왔으며, 일부 국가에서는 PC내부에 프린터 인터페이스 카드를 장착하여 사용자가 아스키 코드로 된 영상 데이터를 입력하면 인터페이스 카드를 거쳐서 레이저 프린터로 고화질의 영상이 출력되게 하였다. 이 때, 이러한 인터페이스 카드는 디지털 하프톤 기법을 하드웨어화하여 만든 것이다.

위에서 언급한 것 외에 디지털 하프톤 기법의 주요한 응용분야로는 잉크젯 프린팅을 포함하여 차세대 영상표시장치인 액정표시(LCD)소자와 플라즈마표시판(PDP)소자를 이용한 영상표시 등이 있다.

하프톤 기법은 디지털적으로 또는 광학적으로 모두 구현 가능하다. 컴퓨터와 프린터 등을 사용한 영상인쇄(표시)는 디지털적으로 구현되며, 신문이나 일반 서적의 영상인쇄는 광학적(아날로그적)으로 구현된다. 일반적으로, 하프톤 기법이란, 디지털적인 경우를 의미하며, 본 논문에서도 디지털적인 경우를 취급하며 이하, 디지털이란 수식어를 생략한다.

하프톤 기법은 다단계의 계조도영상을 2단계의 계조도영상으로 변환하는 양자화처리이므로 필연적으로 양자화처리과정에 기인하는 오차가 발생한다. 하프톤 영상은 이러한 양자화오차와 함께 알고리즘구현시에 발생하는 여러 인공잡음(artifacts), 그리고 최종처리과정인 이진출력장치의 물리적 왜곡 특성으로 인해 원영상에 비해 화질이 상당히 저하된다. 우수한 하프톤 기법이 되기 위해선, 공간해상도가 높아야 하며 표현되는 계조도의 수가 많아 거짓윤곽(false contour)이 발생되지 않아야 하고 눈에 거슬리는 인공잡음이 없어야 하며 속도 또한 실시간을 수행할 정도로 빨라야 한다. 지금까지 연구된 방법 중에서 위에서 언급한 장점을 모두 가지고 있는 방법은 없다. 왜냐하면 각 방법의 장·단점간에 서로 trade-off 관계가 성립되기 때문이다.

기존의 하프톤 방법에는 크게 나누어 點처리방법과 近隣처리방법이 있는데, 전자는 출력의 한 점을 결정하기 위해 입력의 한 화소만을 참조하며 후자는 입력의 주위 여러화소들을 참조한다. 그러므로 전자는 계산시간이 짧고 알고리즘의 구조가 단순한 장점이 있으며 후자는 주위의 정보를 많이 이용하므로 화질이 좋아진다는 장점이 있다. 전자의 대표적인 방법에는 순차적 디더법(ordered dither method)이 있으며, 후자의 대표적 방법에는 오차확산법(error diffusion method)이 있다. 순차적 디더법은 주기적으로 바뀌는 문턱치를 이용하는데, 문턱치들을 주기적으로 배열한 행렬을 하프톤 스크린(halftone screen)이라 하며 하프톤 스크린의 종류에 따라 분산형 디더법(dispersed-dot dither)과

밀집형 디더법(clustered-dot dither)이 있다. 순차적 디더법은 병렬구조를 가져 실시간처리가 가능하나 타 방법에 비해 공간해상도가 낮으며 거칠은곽과 눈에 거슬리는 규칙적인 인공잡음들(e.g. 파레 무늬(Moire' pattern))이 많이 보여 화질이 좋지 못하다. 오차확산법은<sup>(1)</sup> 비선형회귀시스템으로 모델링되며 출력의 왜곡무늬에 오차확산필터를 도입하여 하프톤 오차를 주어진 필터의 가중치로써 필터링시켜 그 결과를 주위화소값에 더함으로써 원영상을 갱신시킨다. 하프톤 오차의 주파수분포 측면에서 볼 때, 갱신된 영상을 입력영상으로 사용하게 되면 오차스펙트럼의 대부분이 시각적으로 둔감한 고주파수에 물리게 된다. 그러므로 오차확산법을 통해 얻어진 영상은 타 방법보다 화질이 좋아진다. 하지만 필터링 연산을 수행하므로 계산시간이 많아지는 단점이 있으며 알고리즘에 기인한 여러 인공잡음들이 생겨 눈에 거슬리는 무늬들이 보이게 된다.

따라서 본 논문에서는 인간의 시각특성을 이용하여 공간해상도가 우수하면서 인공잡음이 거의 없는 하프톤 영상을 생성하는 하프톤 알고리즘을 제안하였다. 생체연구자들에 의해 구해진 시각임펄스응답을 인간시각체계에 대한 시각모델로 정의한 후, 시각모델에 근거를 둔 반복 하프톤처리를 함으로써 원영상과 하프톤 영상사이의 오차(이하, 하프톤 오차)를 시각적으로 둔감한 고주파 부분으로 옮겨 시각적으로 최적인 하프톤 영상을 얻었다. 또한 본 논문에서는 하프톤 처리를 하는데 필요한 문턱치를 종래의 고정된 문턱치를 사용하는 대신 인간의 시각민감도와 정반대의 특성을 갖는 시각변조문턱치(visual-modulated threshold)라는 새로운 可變문턱치를 제안하여 사용하였다. 제안된 문턱치를 사용한 결과 종래의 문턱치를 사용했을 때보다도 오차의 수렴성과 영상의 화질이 향상되었다.

## II. 기존의 하프톤 방법

하프톤 처리에 필요한 영상의 수식표현 및 일반적인 하프톤 처리과정은 다음과 같다. 연속계조도를 가진 입력영상(또는, 원영상)을  $f(x, y)$ 로 표시하며 이 때,  $x, y$ 는 실수값을 가지며(즉, 연속공간에 있으며),  $f(x, y)$ 는 편의상, 0과 1사이의 실수값(즉, 무한 갯수의 계조도)을 갖는다고 정규화한다. 그리고 컴퓨터상에서의 처리를 위해, 스캐너를 통해 공간샘플링(spatial sam-

pling)되고 계조도 양자화(gray-level quantization)가 된 디지털 영상을  $f(i, j)$ 로 표시하며 이 때,  $i, j$ 는 정수값을 가지며  $f(i, j)$ 는 0과 1사이의 범위내에서 256단계의 계조도를 가진다. 프린터와 같은 물리적인 이진출력장치를 거치기 전의 0과 1로만 구성된 하프톤 영상을  $h(i, j)$ 로 표시하며, 물리적 인쇄매체(종이, 화면)위에 출력된 하프톤 영상을  $h(x, y)$ 로 표시하며, 이 때,  $x, y$ 는 출력장치에서의 물리적 공간을 의미한다. 그림 1에 하프톤 영상 형성체계(halftone image rendering system)에 대한 간략화된 모델이 제시되어 있다.

하프톤 처리를 일반적인 수식으로서 간략하게 표현하면 아래와 같다.

$$h(i, j) = \begin{cases} 1, & \bar{f}(i, j) \geq t(i, j) \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (1)$$

식(1)에서,  $\bar{f}(i, j)$ 는 갱신된(updated) 입력영상을,  $t(i, j)$ 는 문턱치(threshold)를 뜻한다.

모든 하프톤 알고리즘은  $\bar{f}(i, j)$ 와  $t(i, j)$ 를 결정하는 방법이 달라진다. 點 처리방법에서는 대부분의 경우  $\bar{f}(i, j)$ 가  $f(i, j)$ 와 같으며, 近隣 처리방법에서는 대부분의 경우

$$\bar{f}(i, j) = f(i, j) + c(i, j) \quad (2)$$

가 되는데 이 때,  $c(i, j)$ 는 사용된 알고리즘에 의해 결정된다. 문턱치  $t(i, j)$ 는 고정된 경우와, 주기적으로 바뀌는 경우와, 각 화소마다 바뀌는 세가지의 경우가 있는데, 點·近隣 처리방법 모두 문턱치를 결정할 때 위의 세가지 중 어느 한가지를 선택한다. 한편  $\bar{f}(i, j)$ 를  $f(i, j)$ 와 같게 하고  $t(i, j)$ 를 가변시키는 것은,  $\bar{f}(i, j)$ 를 식(2)로 하고  $t(i, j)$ 를 고정시키는 것과 같은 효과를 얻을 수 있다.

### 1. 點 처리방법

點 처리방법은 사용되는 하프톤 스크린내의 문턱치들의 값과 배열형태에 따라 여러 방법으로 분류되며 가장 널리 이용되는 대표적인 방법은 순차적 디더법<sup>(2)</sup>으로서, 적절한 크기(보통,  $8 \times 8$ )의 주기적인 하프톤 스크린을

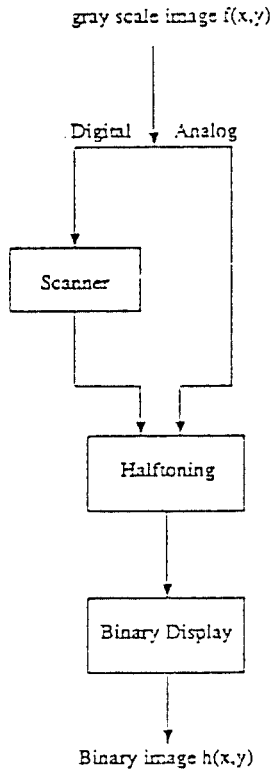


그림 1. 하프톤 영상 형성체계  
Fig. 1. Halftone image rendering system

사용하며 종류로는 서론에서 언급한 것과 같이 밀집형 디더법과 분산형 디더법이 있으며, 전자는 점의 크기가 변하는 아날로그하프톤 영상처럼 인접된 점들을 여러 크기로 뭉쳐서 계조도를 표현하고 후자는 점들을 분산시켜 점들의 밀도로서 계조도를 표현한다. 전자에 사용되는 대표적 스크린으로는 spiral-dot 스크린이 있으며, 후자의 대표적 스크린으로는 Bayer가 제안한 스크린이 있는데 공간해상도에 대해 최적화된 문턱치 행렬을 가지고 있다. 순차적 디더법의 단점으로는 처리된 영상의 일부분에서 왜곡 무늬가 발생되며 스크린의 크기가 작을 경우, 거칠음판이 나타난다. 장점으로는 고립된 점을 표현하지 못하는 이진출력장치를 이용할 경우, 밀집형 디더법을 사용한다면 좋은 화질의 영상을 얻을 수가 있다. 밀집형 디더법의 수정판으로서, 스크린 내의 문턱치의 배열형태가 고리 모양으로 된 고리형 디더법(ring-ordered dither)<sup>(9)</sup>이 있는데 밀집형 디더법보다 공간 해상도가 우수한 장점이 있다.

한 점의 크기가 (R×R)의 정방형이며, 점과 점사이의 거리가 수직, 수평 모두 R인(즉, dot-overlapping 이 없는) 이상적인 이진출력장치에 하프톤 처리된 영상을 표현한다고 가정한다.

출력되는 점의 면적을 표현하기 위해 아래와 같은 함수를 정의한다.

$$rect(x) = \begin{cases} 1, & |x| \leq \frac{1}{2} \\ 0, & otherwise. \end{cases} \quad (3)$$

출력되기 전과 후의 하프톤 영상에 대한 관계식은 아래와 같다.

$$h(x,y) = \sum_{i=0}^{K-1} \sum_{j=0}^{K-1} p[i,j]f(i,j)rect[(x-iR)/R]rect[(y-jR)/R] \quad (4)$$

여기서, (K×K)는 영상의 크기이고 p[i,j,f(i,j)]는 원영상 f(i,j)에 대한 도트 프로파일(dot profile)로서 하프톤 방법에 따른 각 계조도별 이진패턴을 의미한다. 원래 영상은 수많은 계조도가 모여 형성되기 때문에 당연히 원영상 f(i,j)에 대한 도트 프로파일은 출력되기 전의 하프톤 영상과 같다.

$$h(i,j) = p[i,j]f(i,j) = \begin{cases} 1, & f(i,j) \geq t(i,j) \\ 0, & otherwise. \end{cases} \quad (5)$$

여기서, t(i,j)는 문턱치로서, 주기적 배열을 가진다. 순차적 디더법은 원영상의 평균을 보존하는 처리이므로 아래의 수식이 성립한다.

$$\frac{1}{M^2} \sum_{k=-M/2}^{M/2-1} \sum_{l=-M/2}^{M/2-1} p[k,l,g] = g \quad (6)$$

여기서, (M×M)는 하프톤 스크린의 크기를 뜻한다. 원영상의 푸리에 변환은 아래와 같다.

$$F(u,v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x,y) \exp[-i2\pi(ux+vy)] dx dy \quad (7)$$

또한,

$$\text{sinc}(x) = \sin(\pi x) / \pi x \quad (8)$$

로 정의한다.

출력된 후의 하프톤 영상  $h(x,y)$ 의 푸리에 변환은 아래와 같다.

$$H(u,v) = \text{sinc}(Ru)\text{sinc}(Rv) \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_{mn}(u-m/MR, v-n/MR) \quad (9)$$

식(9)에서

$$F_{mn}(u,v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P[m,n,f(x,y)] \exp[-i2\pi(ux+vy)] dx dy \quad (10)$$

$$P[m,n,g] = \frac{1}{M^2} \sum_{k=-M/2}^{M/2-1} \sum_{l=-M/2}^{M/2-1} p[k,l,g] \exp[-i2\pi(mk+nl)/M] \quad (11)$$

과 같이 표현되며 식(10)에서,  $F_{mn}(u,v)$ 를  $(m,n)$  번째 스펙트럼 차수(spectral order)라 하며, 식(11)은 계조도  $g$ 에 대한 도트 프로파일인  $p(k,l,g)$ 의 DFT에 해당한다.

식(11)에서,  $m=n=0$ ,  $g=f(x,y)$ 를 대입하면  $P(0,0,f(x,y))$ 는  $f(x,y)$ 와 같아지며 이 결과를 식(10)에 대입하면  $F_{00}(u,v)$ 가  $F(u,v)$ 와 같게 된다. 이것은 하프톤 영상의 零次 스펙트럼(zeroth-order spectrum)이 원영상의 스펙트럼과 동일하다는 것을 말해준다. 결론적으로 하프톤 영상의 스펙트럼은 원영상의 스펙트럼과 양자화 과정에 의해 기인되는 왜곡된 스펙트럼 성분들(nonzero spectral orders)과의 합으로 표현된다. 왜곡된 스펙트럼 성분들은 영상의 화질에 상당히 나쁜 영향을 끼치는데, 이 스펙트럼 내의 에너지의 존재는 눈에 거슬리는 여러 규칙적인 인공잡음들과 영상의 섬세한(detail) 부분의 손실, 즉, 공간해상도의 저하를 초래한다. 특히 零次 스펙트럼 근처의(작은  $m, n$ 을 가지는) 스펙트럼 차수 내의 에너지 성분들이 대부분의 인공잡음을 발생시킨다.

## 2. 近隣 처리방법

대부분의 방법들이 필터링 연산 및 영상의 국부적인 통계학적 성질을 사용하므로 계산량과 계산시간이 點 처리방법보다도 훨씬 많이 드는 단점이 있으나 영상의 정보를 이용하여 적용성있게 처리를 하므로 화질은 현저하게 증가한다. 이 부류의 대표적 방법인 오차확산법을 예로 들어 설명한다.

오차확산법이 수학적으로 체계화되기 전에 1975년 Floyd와 Steinberg는 하프톤 오차를 주어진 가중치에 의해 주위의 화소에 적절히 분산시킴으로써 하프톤 영상의 화질을 이전보다 현저하게 개선시켰는데, 그들은 가중치를 결정하는 데 있어 영상의 중간계조도가 바둑판무늬(checkerboard pattern)를 가지게끔 여러 번의 시행착오를 거쳤다.<sup>(1)</sup> 뒤이어 가중치를 여러모로 변화시켜 화질과 처리시간을 개선하고자 하는 일련의 시도가 있었다. 이 방법의 주요한 장점은 윤곽과 같은 영상의 섬세한 부분을 탁월하게 표현하는 데 있으며, 단점으로는 여러형태의 인공잡음들이 발생한다는 것이다. 인공잡음의 종류로는 다음과 같다.<sup>(2)</sup>

먼저 상관성 인공잡음(correlated or history artifacts)이 있는데 오차가 주위 화소에 확산되면 그로 인해 화소들간에 상관관계가 증가하는데 이러한 상관관계로 인해 발생되며, 계조도래프(gray-level ramp)에 잘 나타난다. 또한 방향성 인공잡음(directional hysteresis artifacts)이 있는데 화소의 처리 방향(單방향)에 의해 기인되며, 매우 밝고 매우 어두운 영역과 밝기가 완만하게 변화하는 영역에서 강하게 나타난다. 그밖의 인공잡음으로는 경계영역 근처의 급격한 변화(transient behavior near boundaries)와 윤곽부분의 미약한 잡음 형성(слightly noisy rendition of edges)이 있는데 처리되는 영상의 내용에 따른 알고리즘의 의존성에 기인하므로 사용되는 영상의 종류에 따라 다소 차이가 생긴다.

오차확산법은 인공잡음의 단점에 비해 화질이 매우 우수하므로 여러 사람들에 의해 연구되었는데 그들의 주된 연구 주제로는 인공잡음의 감소와 병렬처리구조의 도입이었다. 근래 들어, 또 하나의 연구주제로서, 오차확산법에 필터이론을 적용하여 주파수 영역에서의 하프톤 오차를 최적 분포시키도록 오차확산필터를 설계하는 연구<sup>(4)</sup>가 일어났다.

오차확산법에는 여러 수정안들이 있는데 그 중 몇 가지 경우를 살펴보면 오차확산필터의 개수, 위치를 조절

하거나 가중치를 확률적 처리로써 적절히 변경(perturbation)하여 인공잡음을 감소시키는 방법이 있으며 문턱치를 원영상에 적응적으로 가변시키거나 문턱치의 일정한 범위내에서 그 값을 불규칙 변동시켜 영상의 윤곽을 살리거나 인공잡음을 감소시키는 방법이 있으며 화소의 처리방향을 단방향으로 하지 않고 뱀모양의 走査(serpentine raster)<sup>(2)</sup>와 같이 양방향으로 하거나, Peano curve나 Hilbert curve와 같이 다방향으로 하여 방향성에 기인되는 인공잡음을 감소시키는 방법이 있으며 오차확산법에 인간의 시각특성을 도입하여 시각적으로 최적인 화질을 얻는 방법이 있는데 이 방법은 기존의 오차확산필터를 사용하되, 오차의 제환루프(error feedback loop)에 인간의 시각임펄스응답을 도입시킨다. 그림 2에 오차확산처리에 대한 블록 다이어그램을 나타내었다.

오차확산법에서, 원영상은 아래와 같이 갱신된다.

$$y(i,j) = f(i,j) + \sum_{R-\infty}^{\infty} \sum_{(0,0)} w(m,n)d(i-m,j-n) \quad (12)$$

식(12)에서  $w(m,n)$ 는 오차확산 가중치계수로서, 오차의 증폭과 감폭을 방지하기 위해

$$\sum_{R-\infty}^{\infty} \sum_{(0,0)} w(m,n) = 1 \quad (13)$$

을 만족시키며  $d(i-m,j-n)$ 는 주위의 화소에 전달되는 오차로서, 문턱치 오차(threshold error)라고 하며

$$d(i,j) = y(i,j) - h(i,j) \quad (14)$$

로 정의되고  $R$ 을 2차원 비대칭 반평면창(2-D non-symmetric half-plane window)이라 하며, 아래와 같은 영역에 의해 정의된다.

$$R = \{0 \leq m \leq N, 0 \leq n \leq N\} \quad (15)$$

$$U = \{-N \leq m \leq -1, 1 \leq n \leq N\}$$

식(15)에서  $N$ 은 창 크기를 나타낸다.

오차확산법에서 하프톤 영상은 아래와 같이 구해진다.

$$h(i,j) = \begin{cases} 1 & , y(i,j) \geq TH \\ 0 & , otherwise. \end{cases} \quad (16)$$

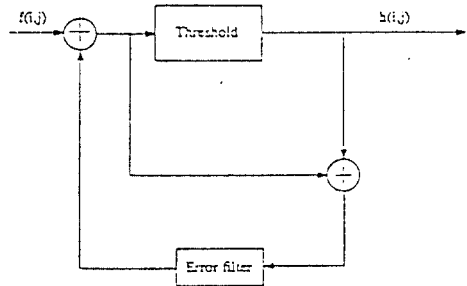


그림 2. 오차확산처리의 블록 다이어그램  
Fig. 2. Block diagram of error diffusion process

여기서, TH는 문턱치로서 보통, 중간 계조도(0.5)의 고정된 값을 가진다.

식(12)와 식(14)을 이용하여 하프톤 오차를 구하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} e(i,j) &= f(i,j) - h(i,j) \\ &= y(i,j) - \sum_{R-\infty}^{\infty} \sum_{(0,0)} w(m,n)d(i-m,j-n) \\ &\quad - y(i,j) + d(i,j) \\ &= d(i,j) - \sum_{R-\infty}^{\infty} \sum_{(0,0)} w(m,n)d(i-m,j-n) \end{aligned} \quad (17)$$

식(17)을 공간주파수영역으로 변환하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} E(u,v) &= D(u,v) - W(u,v)D(u,v) \\ &= [I(u,v) - W(u,v)]D(u,v) \end{aligned} \quad (18)$$

여기서,  $W(u,v)$ 는 일반적으로, 저역통과특성을 가지며  $I(u,v)$ 는 전대역통과특성을 가진다.

식(18)에서 알 수 있듯이, 하프톤 오차의 스펙트럼  $E(u,v)$ 는 문턱치 오차의 스펙트럼  $D(u,v)$ 의 고역통과 부분이 되어, 대부분의 하프톤 오차가 고역부분에 몰려 있다는 것을 알 수 있다. 이것은 오차확산법이 고주파에 둔감한 인간의 시각특성과 잘 일치함을 말해 준다.

### Ⅲ. 하프톤 映像의 畫質評價方法

하프톤 기법의 화질평가에는 크게 객관적 평가와 주관적 평가로 분류된다. 객관적 평가로는 하프톤 영상이 원영상의 윤곽부분(edge)을 얼마나 정확하게 표현하는가를 측정하는 방법<sup>(5)</sup>과 원영상과 하프톤 영상의 국부 평균(local average)이 얼마나 일치하는가를 측정하는 방법 등이 있다. 주관적 평가로는 화질에 대한 인간의 시각심리를 이용하여 화질의 우열을 가리는 방법<sup>(6)</sup>이 있다.

#### 1. 輪廓 相關度

영상의 중요한 정보는 대부분 윤곽부분에 있기 때문에, 원영상의 전체적인 윤곽과 하프톤 영상의 윤곽이 얼마나 일치하는가를 측정하는 것은 화질평가에 있어, 상당한 중요성을 가진다. 아래에 윤곽의 상관 정도를 측정하는 공식이 제시되어 있다.

F와 D를 각각 원영상 A에 대한 前向 差연산자(forward difference operators)와 下向 差연산자(downward difference operators)라고 할 때, A의 크기가 (M×N)이라면, FA는 M×(N-1)의 배열을 가지며, FA의 i, j 번째 원소는 아래와 같이 주어진다.

$$(FA)_{i,j} = A_{i,j+1} - A_{i,j} \quad (19)$$

여기서,  $1 \leq i \leq M$  and  $1 \leq j \leq N-1$ 을 만족한다.

DA는 (M-1)×N의 배열을 가지며, i, j 번째 원소는 아래와 같이 주어진다.

$$(DA)_{i,j} = A_{i+1,j} - A_{i,j} \quad (20)$$

여기서,  $1 \leq i \leq M-1$  and  $1 \leq j \leq N$ 을 만족한다.

그리고, H를 원영상 A에 대한 하프톤 영상이라고 하면 FH와 DH를 식(19), 식(20)과 같이 정의할 수 있다.

위의 수식들을 이용하여 윤곽 상관도(edge correlation)는 아래와 같이 정의된다.

$$c = \frac{1}{M(N-1)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N-1} (FA)_{i,j} (FH)_{i,j} + \frac{1}{N(M-1)} \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^N (DA)_{i,j} (DH)_{i,j} \quad (21)$$

c의 값이 클수록 원영상과 하프톤 영상의 윤곽부분이 잘 일치한다고 말할 수 있다.

윤곽 상관도에 의한 평가방법은 시각심리학적 평가방법과 그 결과가 때때로 일치하지 않는다. 왜냐하면, 인간의 시각은 어떤 측면에서 윤곽(거짓윤곽 포함)이 분명하면서 거친 질감을 가진 영상보다 부드러운 질감이 있는 영상에 대해 덜 거부감을 느끼는 경향이 있기 때문이다. 하지만 문자와 영상이 혼재되어 있는 문서의 하프톤 처리에 있어서는 윤곽이 중요하므로 윤곽 상관도가 절대적으로 중요한 평가지수가 된다.

#### 2. 局部 平均 一致度

하프톤 처리時, 윤곽 정보의 중요성과 더불어 원영상의 국부적인 평균을 보존하는 것 또한 매우 중요하다. 만일 원영상의 국부평균의 보존정도가 매우 나쁜 하프톤 방법을 사용했을 경우, 이진출력을 하게 되면 출력영상의 전체적인 명암 및 국부적인 명암이 원영상의 그것들과 많이 달라진다. 그래서 본 논문에서는 원영상과 하프톤 영상과의 국부 평균이 얼마나 잘 일치하는가를 나타내주는 평가지수를 제안했으며, 국부평균일치도(local mean accordance)라고 정의하였다.

먼저, 영상들을 여러 부분으로 나누어 각 부분에 대한 국부평균을 구하는데, 원영상의 국부평균을  $Lm_f$ 이라고 하고 하프톤 영상의 국부평균을  $Lm_h$ 라고 하면,

$$Lm_f = \frac{1}{M^2} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{M-1} f(i,j) \quad (22)$$

$$Lm_h = \frac{1}{M^2} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{M-1} h(i,j) \quad (23)$$

가 된다. 여기서, (M×M)은 국부 평균을 구하기 위한 영역의 크기이다.

국부 평균일치도는 다음과 같이 정의된다.

$$A_{lm} = \frac{1}{E\{(Lm_h - Lm_f)^2\}} = \frac{1}{\frac{1}{N^2} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} (Lm_{h(k,l)} - Lm_{f(k,l)})^2} \quad (24)$$

식(24)에서,  $(N \times N)$ 은 국부영역의 갯수이며  $A_{lm}$ 가 클수록, 즉, 식(24)의 분모가 작을수록 하프톤 영상과 원영상의 국부 평균이 잘 일치한다. 일반적으로, 원영상과 하프톤 영상과의 국부평균의 차이는 전역적인 평균 차이와 비례관계에 있다.

### 3. 視覺心理學的 檢査

영상을 관측하고 평가하는 주체는 인간이기 때문에 인간의 시각심리학에 근거를 둔 평가 방법은 나름대로의 가치가 있다. 흔히 사용되는 시각심리학적 검사(psychovisual test)는 다음과 같다.

몇십 명의 관측자가 10 인치 정도의 관측거리에서 하프톤 기법에 대한 아무런 사전 지식이 없이, 단지 원영상과의 유사성에 대한 주관적인 기준에 따라 등급을 매긴다. 보통, 5단계의 등급을 정하는데 Excellent, Good, Fair, Poor, Bad 의 순서를 주로 사용한다. 이때, 제공되는 영상의 갯수는 많을수록 좋으며 각 영상의 내용이 다양해야 한다. 또한 관측자에게 영상을 제시할 때 각 사람마다 영상을 보여주는 순서를 달리한다. 검사를 마친 후, 결과들을 모아 각 하프톤 방법에 대한 평균과 표준편차를 구한다. 이때, 평균과 표준편차는 관측자와 영상을 종합하여 구한다.

## Ⅳ. 提案된 反復 하프톤 方法

우수한 하프톤 기법은 시각적으로 최적인 하프톤 영상을 얻어야만 한다. 그래서 본 장에서는 인간의 시각모델에 근거를 둔 반복 하프톤 방법을 제안하여 시각최적화를 달성하고자 한다. 참고로, 순차적 디더법의 경우는 시각적으로 최적인 하프톤 스크린을 도입하여 시각최적화를 달성하며, 오차확산법은 오차확산필터를 적절히 설계하여 시각최적화를 달성한다. 그러나 순차적 디더법과 오차확산법에 의한 시각최적화는 각각 공간해상도의 손실과 인공잡음의 존재라는 화질상의 문제점을 가지고 있다. 하지만 본 장에서 제시하는 제안된 시각최적화방법은 원영상과 하프톤 영상사이의 시각오차(visual error)를 정의하여 공간영역에서의 반복처리<sup>(6)</sup>를 통해 시각오차를 감소시키는 방법이다. 이때, 가장 중요한 사항은 시각오차를 얼마나 정확하게 정의하는 가인데, 인간의 시각체계(시스템)의 임펄스응답을 정확하게 구하

지 못하면 절대로 올바른 시각오차를 정의할 수가 없다. 인간의 시각체계에 대한 연구는 과거 수십년동안 관련분야의 학자들에 의해 진행되어 왔으며 현재에도 많은 연구를 하고 있다. 본 논문에 사용된 시각의 임펄스응답으로는 Kollias 등이 정신물리학적 실험(psychophysical experiments)을 통해 시행착오를 거쳐 얻은 결과를 적용하였는데,<sup>(7), (8)</sup> 그들은 여러가지의 영상들과 그에 대응하는 각 영상에 대한 잘 처리된 하프톤 영상의 쌍(pairs)을 미리 정해 놓고 대응되는 쌍사이의 왜곡함수(distortion function)의 값이 최소가 되도록 임펄스응답의 계수들을 구했다.

하프톤 기법에 있어, 반복처리에 의해 갱신된 원영상을 하프톤 영상으로 변환하기 위해선 문턱치를 사용해야 하는데, 보통 원영상의 중간계조도를 사용한다. 하지만, 본 논문에서는 이러한 고정된 문턱치를 사용하는 대신 인간의 시각민감도와 정반대의 특성을 갖는 시각변조문턱치라는 가변 문턱치를 제안하여 사용하였다. 제안된 문턱치는 인간의 시각민감도와 정반대의 특성을 가지므로 시각 최적화를 더욱 촉진시키며, 기존의 문턱치를 사용했을 때보다 화질을 향상시킨다.

### 1. 視覺誤差의 定義 및 反復處理

$$e = v[f, g] \tag{25}$$

여기서,  $f, g$ 는 각각 원영상과 하프톤 영상을 나타내며  $e$ 는 시각모델에 의해 결정되는 시각오차를 나타낸다.

식(25)에서 연산자  $v[\cdot]$ 는 인간의 시각모델을 도입하여 시각적으로 타당한 오차를 발생시키는데, 일반적으로 시각오차  $e$ 는 아래와 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} e &= v[f, g] = h*(f-g) \\ &= \mathcal{F}^{-1}[H(F-G)] \end{aligned} \tag{26}$$

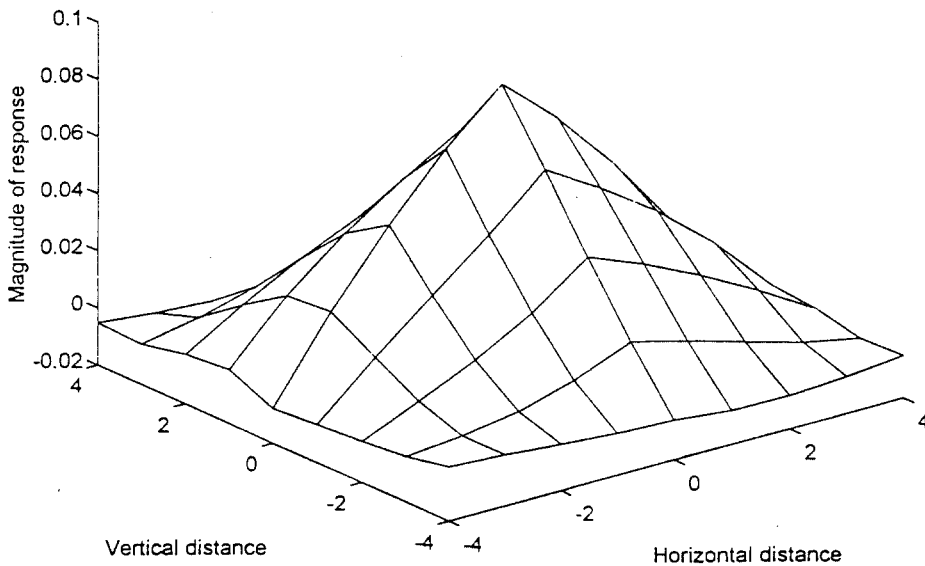
여기서,  $h$ 는 시각의 임펄스응답을 나타내며  $H$ 는 시각의 시스템함수를 나타내며  $F, G$ 는 각각 원영상과 하프톤 영상의 푸리에 변환을 나타내며  $*$ 는 2차원 컨볼루션을 나타낸다.

그림 3에 본 논문에서 사용한 시각의 임펄스응답계수를 3차원 그래프와 함께 나타내었으며 그림 4에 시각의 시스템함수 즉, VMTF(visual modulation trans-



-0.001048	-0.002227	-0.003931	-0.005503	-0.006289	-0.008254	-0.008385	-0.007206	-0.005241
-0.004193	-0.002424	0.000786	0.006092	0.014150	0.009237	0.003407	-0.002096	-0.006027
-0.005765	0.002882	0.011923	0.022797	0.036948	0.029086	0.019784	0.009172	-0.002620
-0.006682	0.011300	0.027449	0.043367	0.060662	0.048969	0.035506	0.019162	-0.001179
-0.007861	0.020439	0.045333	0.066553	0.083853	0.066553	0.045333	0.020439	-0.007861
-0.001179	0.019162	0.035506	0.048969	0.060662	0.043367	0.027449	0.011300	-0.006682
-0.002620	0.009172	0.019784	0.029086	0.036948	0.022797	0.011923	0.002882	-0.005765
-0.006027	-0.002096	0.003407	0.009237	0.014150	0.006092	0.000786	-0.002424	-0.004193
-0.005241	-0.007206	-0.008385	-0.008254	-0.006289	-0.005503	-0.003931	-0.002227	-0.001048

(a)



(b)

그림 3. (a) 인간시각체계의 근사적인 임펄스응답계수  
 (b) 3차원공간영역표현 (참고문헌(7)에서 참조)  
 Fig. 3. (a) Approximate impulse response coefficients of human visual system  
 (b) Its 3-D spatial domain representation (Ref.(7) S. Kollias)

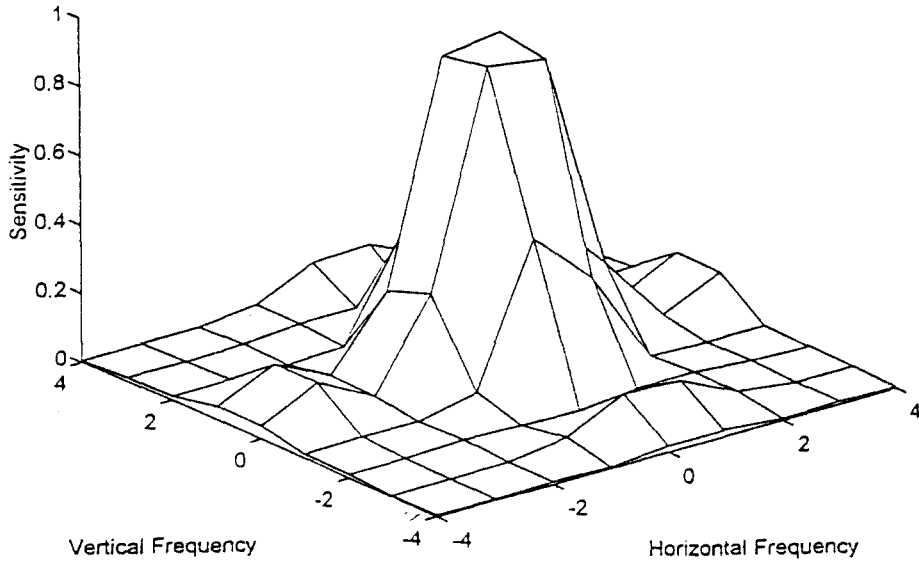


그림 4. 본 논문에 사용된 시각모델의 시각변조함수곡선  
Fig. 4. VMTF curve of the used visual model

fer function)곡선을 나타내었다.

반복 방법에 의해 원영상은 아래와 같이 갱신된다.

$$f_{k+1} = f_k + \lambda e_k \tag{27}$$

$$e_k = h*(g_k - f) \tag{28}$$

$$g_k = \begin{cases} 1, & f_k \geq TH, \\ 0, & otherwise. \end{cases} \tag{29}$$

식(27), (28), (29)에서  $f_k$ 는 k번 반복 후의 원영상을 나타내며,  $\lambda$ 는 오차의 수렴을 조절하는 고정된 (fixed) 파라미터이며,  $g_k$ 는  $f_k$ 에 대한 하프톤 영상이며 TH는 문턱치를 나타낸다.

시각오차에 대한 평균자승오차(MSE)는 아래와 같이 정의한다.

$$MSE = \frac{1}{N^2} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} \{h*(f - g)\}^2 \tag{30}$$

여기서,  $N \times N$ 은 영상의 크기를 나타낸다.

## 2. 視覺變調문턱치

본 논문에서는 인간의 시각민감도와 정반대의 특성을 가지는 가변문턱치를 제안하여 기존의 고정된 문턱치 대신에 사용하였다. 제안한 가변문턱치를 시각변조문턱치 (visual-modulated threshold)라고 정의하며, 수식적으로 표현하면 아래와 같다.

$$TH = w - h * w \tag{31}$$

여기서,  $w$ 는 이상적인 백색잡음으로서, 가우시안 백색잡음을 사용한다.

식(31)을 공간주파수영역에서 표현하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} TH &= \mathcal{F}^{-1} [W - HW] \\ &= \mathcal{F}^{-1} [(I-H)W] \end{aligned} \tag{32}$$

여기서,  $I$ 는 전대역통과(all-pass)특성을 갖는다.

식(32)에서 알 수 있듯이, 시각변조 문턱치 TH의 주파수분포는 시각의 시스템함수 H와 정반대의 분포를 갖는다. TH는 최대값이 1이 되도록 정규화시킨다.

V. 實驗 結果

실험에 사용한 영상들은 256×256크기와 256단계의 계조도를 갖는 Lena영상과 계조도를 밝기 순으로 나열한 계조도 램프이며 식(27), (28), (29)에서 k=0일 때의 초기화 영상  $f_0$ ,  $g_0$ 은 각각, 원영상과 백색잡음에 의한 하프톤 패턴을 사용하였으며,  $f_k$ 는 0~1 범위의 값을 갖도록 정규화하였다.

실험에 의하면, 식(27)에서의 파라미터  $\lambda$ 는 0~0.5의 범위에서, 사용되는 영상의 평균밝기에 따라 적당한 값을 가지는데 평균밝기가 밝을수록  $\lambda$ 값이 작아지는 경향이 있다. Lena영상의 경우,  $\lambda$ 가 0.05~0.1정도에서 시각적으로 가장 우수하게 보였다.

본 논문에서 제안한 시각변조문턱치를 식(29)의 TH에 적용하여 반복처리한 결과, 50~80회의 반복횟수에서 MSE가 수렴했으며, 고정된 문턱치를 사용했을 때보다 MSE가 더 낮아졌다.

제안한 시각변조문턱치의 우수성을 입증하기 위해 그림 5에 Lena영상을 사용하여 중간계조도(0.5)의 값을 갖는 고정된 문턱치와 제안된 시각변조문턱치에 대해 식(30)에 따른 MSE곡선을 그려 본 결과, 고정된 문턱치를 사용한 경우, 100회 반복후의 MSE는 318.38이었으며 시각변조문턱치를 사용한 경우의 MSE는 36.77이어서 무려 오차가 1/9배 감소하였다.

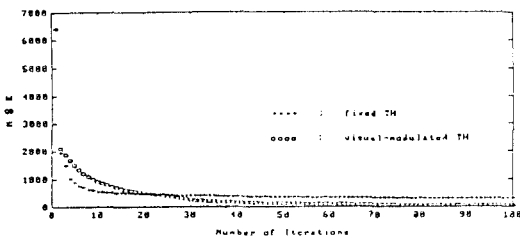


그림 5. Lena영상에 대한 평균자승오차곡선  
Fig. 5. MSE curves for Lena image

그림 6과 그림 7에 제안된 문턱치를 사용한 반복 하프톤처리를 해 얻어진 하프톤 영상들을 타 방법에 의해 얻어진 영상들과 함께 화질비교의 목적으로 제시하였다. 특히, 그림 6의 영상들에 대해선, 대조도(contrast)의 향상을 위해 하프톤 처리전에 계조도 분포조정(tone scale adjust)이라는 전처리과정을 거쳤다. 그림 8에

계조도 분포조정 그래프가 제시되어 있는데, 명확한 흑백의 대비를 위해 0.05 이하와 0.95 이상의 계조도를 각각 0과 1로서 일괄적으로 처리하였다.

알고리즘의 우열에 의한 화질평가를 위해 즉, 각 방법들간의 단점과 장점들을 명확히 관찰하기 위해 그림 6과 그림 7의 하프톤 영상들은 150 dpi이하의 저해상도로 인쇄하였다. 또한 보완적으로 고해상도에서의 화질평가를 위해서 450dpi의 해상도로 인쇄된 하프톤 영상을 그림 9에 제시하였다.

제안된 방법의 우수성을 보이기 위해 화질평가를 실시하되, 주관적 화질평가(시각심리학적 검사)는 생략하였다.

원영상과 처리된 하프톤 영상 간의 일치도를 나타내기 위하여 3장에서 설명한 윤곽상관도와 국부평균일치도를 사용하여 그림 6의 하프톤 영상들의 화질을 측정된 결과가 표 1에 제시되어 있다. 윤곽상관도는 식(21)에서와 같이 원영상과 처리된 하프톤 영상 간의 상관을  $c$ 로 표시하고,  $c$ 값이 클수록 상호 간의 윤곽이 잘 일치함을 나타낸다. 국부평균일치도는 출력영상의 전체적인 밝기 뿐만 아니라 부분적인 밝기도 얼마나 달라지는가에 대한 척도로서 식(24)에 나타난  $\bar{m}$ 과 같이  $A_{1m}$ 으로 표시하고  $A_{1m}$ 의 값이 클수록 처리된 영상의 평균밝기가 원영상과 일치함을 나타낸다.

표 1. 화질평가결과

\* 밀집형 디더법(=100)에 대한 상대적인 값들이 사용됨

Table 1. Results of image quality evaluation

\* Relative values to C.D. method (=100) is used

Method	Metric	
	c	$A_{1m}$
C.D.	100(%)	100 (%)
D.D.	102.6	101.8
E.D.	142.8	2873.5
Proposed.	175.3	971.4

표 1에 나타난 결과를 보면, 윤곽상관도  $c$ 는 제안된 방법이 가장 높으며, 오차확산법(error diffusion method)(이하, E.D.)이 중간수준이며 밀집형 디더법(clustered-dot dither)(이하, C.D.)과 분산형 디더법(dispersed-dot dither) (이하, D.D.)이 거의 같은 수준으로 가장 낮았다. 이것은 제안된 방법에 의해 생성된 하프톤 영상의 윤곽이 원영상의 윤곽과 가장 일



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

그림 6. 여러 방법들에 의해 얻어진 하프톤 Lena영상

- (a) 원영상 (b) 오차확산법
- (c, d) 분산형, 밀집형 순차적 디터법 (e) 제안된 방법

Fig. 6. Halftoned Lena images obtained by different methods

- (a) Original image (b) Error diffusion method
- (c, d) Dispersed, Clustered ordered dither
- (e) Proposed method

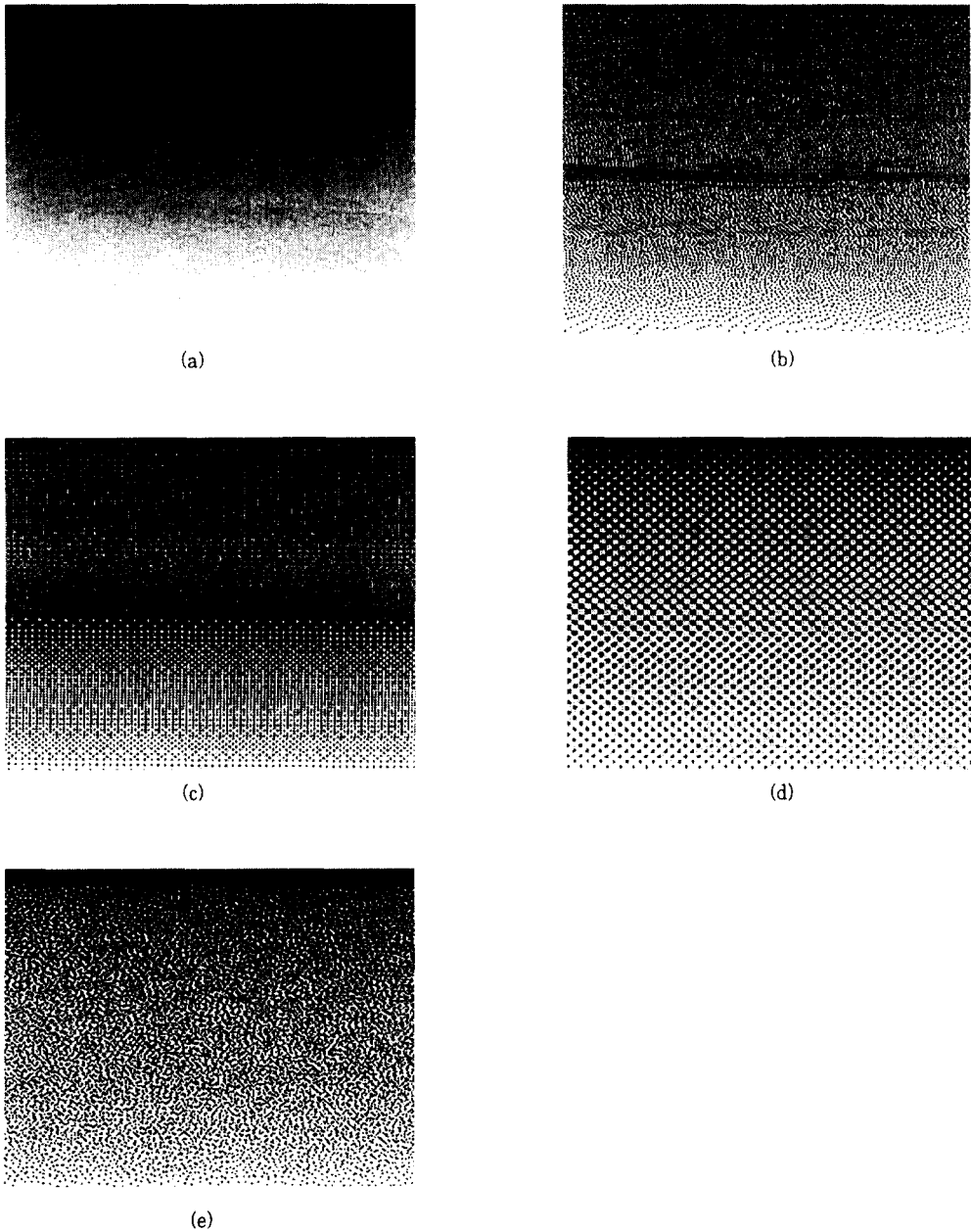


그림 7. 여러방법들에 의해 얻어진 하프톤 제조도 램프

(a) 원영상 (b) 오차확산법  
(c, d) 분산형, 밀집형 순차적 디터법 (e) 제안된 방법

Fig. 7. Halftoned gray-level ramps obtained by different methods  
(a) Original image (b) Error diffusion method  
(c, d) Dispersed, Clustered ordered dither  
(e) Proposed method

치한다는 것을 말해준다.

국부평균일치도  $A_{lm}$ 은 E.D. 이 가장 높은 값을 가지며 제안된 방법이 중간수준이며 C.D.와 D.D.가 가장 낮았다. 그런데 2장에 있는 식(6)에서 알 수 있듯이 순차적 디터법은 하프톤 스크린을 사용함으로써 원영상의 국부평균 및 전역평균이 그대로 보존된다. 그래서 순차적 디터법보다 매우 높은  $A_{lm}$ 을 가진다고 해서 원영상의 국부평균을 타방법에 비해 월등하게 보존한다고 말할 수 없다. 다시 말해, 순차적 디터법보다  $A_{lm}$ 이 낮으면 원영상의 국부평균보존이 나쁘다고 말할 수 있으며 같거나 높으면 국부평균보존이 매우 잘되었다고 말할 수 있다. 표 1에서 볼 수 있듯이, 제안된 방법과 E.D. 둘 다 순차적 디터법의  $A_{lm}$ 보다 훨씬 높기 때문에 원영상의 국부평균을 잘 보존하고 있다.

두 가지 화질평가지수를 종합하여 화질을 비교한 결과 제안된 방법과 E.D가 거의 비슷한 수준으로 가장 높았으며, D.D.가 중간수준이었으며, C.D.가 가장 낮았다. 하지만 앞서 언급한 화질평가지수들은 정량적인 평가였기 때문에 직접 영상을 보면서 화질비교를 하는 정성적인 평가가 동시에 병행되어야 더욱 정확한 화질평가가 될 수 있다.

그림 6에서 볼 수 있듯이, E.D.에 의한 Lena영상은

공간해상도는 좋으나 인공잡음들이 영상 전반에 걸쳐 보이며 D.D.에 의한 Lena영상은 눈에 거슬리는 규칙적인 무늬와 거칠음곽이 보이며 C.D.에 의한 Lena영상은 점들이 뭉쳐져 있으므로 전반적으로 공간해상도가 낮다. 제안된 방법에 의한 Lena영상은 E.D.에서 보이는 인공잡음이 보이지 않을 뿐더러 공간해상도 또한 D.D.나 C.D.보다 높다.

그림 7에서 볼 수 있듯이, E.D.에 의한 제조도래프의 경우, 중간제조도 근처에서 수직방향의 띠들과 대각선방향의 규칙적인 선들이 심하게 보이며 D.D.에 의한 제조도래프의 경우, 전반적으로 규칙적으로 발생하는 무늬들이 보이며 C.D.에 의한 제조도래프의 경우, 공간해상도가 너무 낮아 눈에 거슬림을 준다. 그러나 제안된 방법에 의한 제조도래프는 전체적으로 부드러운 질감을 가지고 있다.

그림 6과 그림 7을 통해 볼 때, 언뜻 보기에는 제안된 방법이 E.D.보다 공간해상도가 낮은 것처럼 보이지만 해상도를 높여 인쇄하게 되면 인공잡음측면과 공간해상도측면에서 다른 세 방법들보다 우수함을 알 수 있다. 그림 9에 450dpi로 인쇄된 Lena영상들을 보아 알 수 있듯이 제안된 방법에 의한 영상의 화질이 가장 우수하다.

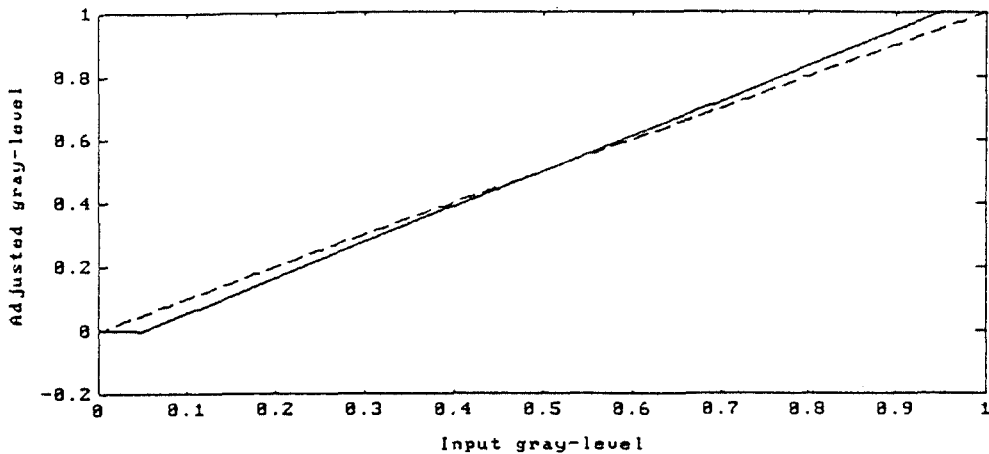


그림 8. 제조도 분포조정 곡선  
Fig. 8. Tone-scale adjust curve



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

그림 9. 450dpi의 해상도로 인쇄된 하프톤 Lena영상

(a) 원영상 (b) 오차확산법

(c, d) 분산형, 밀집형 순차적 디더법 (e) 제안된 방법

Fig. 9. Halftoned Lena images printed with 450dpi resolution

(a) Original image (b) Error diffusion method

(c, d) Dispersed, Clustered ordered dither

(e) Proposed method

Ⅶ. 結 論

본 논문에서는 공간주파수에 대한 인간의 시각민감도를 모델링한 시각모델에 기반을 둔 시각오차를 정의하여 반복방법을 통해서 하프톤 처리를 행하였으며 시각변조 문턱치라는 시각적으로 최적변조된 가변문턱치를 제안하여 사용한 결과, 종래의 고정된 문턱치를 사용했을 경우보다 수렴성과 화질이 더욱 향상되었다. 또한 본 논문에서는 「국부평균일치도」라는 새로운 화질평가지수를 제안하여 화질평가실험에 사용하였다.

제안된 방법을 실험한 결과, 기존의 방법들에서 흔히 볼 수 있었던 인공잡음들이 제거되었으며 동시에 공간해상도도 향상되었다. 화질평가방법을 사용하여 화질을 평가한 결과, 기존의 방법들보다 원영상과의 윤곽이 더 일치하였고 원영상의 국부평균보존 또한 우수하게 나타났다.

인간의 시각특성을 하프톤 알고리즘에 도입하는 것은 의미있는 일이었으며, 오차확산법이나 순차적 디더법 또는 그 밖의 여러 기존의 하프톤 방법들 속에 인간의 시각모델을 적용한다면 화질향상에 기여하리라 생각되므로 앞으로 계속 연구해 볼 가치가 있는 주제라고 생각된다.

향후의 연구 과제로는 첫째, 인간의 시각체계를 보다 깊이 연구하여 더욱 정확한 시각임펄스응답을 구해야 할 것이며, 둘째, 하프톤 영상의 화질을 최종적으로 결정짓는 이진출력장치의 왜곡특성을 파악하여 하프톤 알고리즘속에 도입시켜야 할 것으로 생각된다.

參考文獻

1. R.W. Floyd and L. Steinberg, An Adaptive

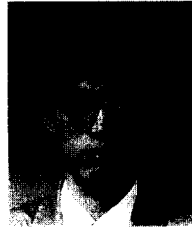
Algorithm for Spatial Grayscale, Proceedings of the SID, vol.17, no.2, pp.75-77, 1976.  
 2. R.A. Ulichney, Digital Halftoning, MIT Press, Cambridge, MA, 1987.  
 3. O. Bryngdahl, Halftone Images : Spatial Resolution and Tone Reproduction, J. of Opt. Soc. Amer., vol.68, no.3, pp.416-422, 1978.  
 4. S. Weissbach, F. Wyrowski, Error Diffusion Procedure : Theory and Applications in Optical Signal Processing, Appl. Opt., vol.31, no.14, pp.2518 -2534, 1992.  
 5. Theophano Mitsa, Digital Halftoning Using a Blue-Noise Mask, Ph.D. dissertation, University of Rochester, Rochester, NewYork, 1991.  
 6. J.P. Allebach, Visual Model-Based Algorithms for Halftoning Images, SPIE, vol.310, pp.151-158, 1981.  
 7. S. Kollias, D. Anastassiou, A Progressive Scheme for Digital Image Halftoning, Coding of Halftones, and Reconstruction, IEEE J. of Selected Areas in Communications, vol.10, no.5, pp.944-951, 1992.  
 8. S. Kollias, D. Anastassiou, A Unified Neural Network Approach to Digital Image Halftoning, IEEE Trans on Signal Processing, vol.39, no.4, pp.980-984, 1991.





**李 泰 鴻 (Tae Hong Lee)** 정희원  
 1952년 7월 27일생  
 1975년 2월 : 서울대학교 공업교육학  
 과 졸업(공학사)  
 1976년 5월~1979년 10월 : 동양정  
 밀(주) 중앙연구소 근무  
 1980년 2월 : 서울대학교 대학원 공  
 업교육학과 졸업(석사)

1980년 1월~1981년 2월 : 금성전기(주) 기술연구소 근무  
 1981년 3월~현재 : 영남대학교 전자공학과 교수  
 1984년 3월~1987년 2월 : 서울대학교 대학원 전자공학과  
 수료(박사)  
 1990년 9월~1991년 8월 : 미국 Syracuse Univ. 객원교수  
 ※ 주관심분야 : 신호처리, 영상복원



**李 東 園 (Dong Won Lee)** 정희원  
 1970년 12월 27일생  
 1993년 2월 : 영남대학교 전자공학과  
 졸업(공학사)  
 1995년 2월 : 영남대학교 대학원 전  
 자공학과 졸업(석사)  
 1995년 1월~현재 : 웨스트시스템  
 (주) 기술연구소 근무

※ 주관심분야 : 신호처리, 영상신호처리