

論文2000-37SP-4-1

균일한 도트 분포를 위한 문턱값 변조 오차확산 방법

(A Threshold Modulated Error Diffusion Method for Homogeneous Dot Distributions)

姜 奇 珉 * , 金 椿 宇 *

(Ki-Min Kang and Choon-Woo Kim)

요 약

디지털 영상 출력 장치를 위해 연속 계조 영상을 이진 영상으로 변환하는 오차확산 방법은 사람의 시각 특성에 적합한 고주파 성분의 이진 영상을 만들어 내지만 균일하지 못한 점의 분포로 인해 영상의 화질을 저하시키는 패턴이 발생하게 된다. 이러한 단점을 해결하기 위해 다양하게 개선된 오차확산 방법들이 제안되었다. 본 논문에서는 우선 오차확산 방법이 균일한 점의 분포를 발생시키지 못하는 원인을 분석하고 주기함수를 이용하여 이진 문턱값을 조절함으로써 이진 영상의 점의 분포를 균일하게 하여 화질을 향상시키는 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 이진 영상의 화질을 결정하는 소수 화소(minor pixels)가 주어진 계조에 따라 일정한 주거리(principal distance)를 갖도록 하여 이진 화소의 뭉침 현상이나 공백 현상을 최소화 하고 균일한 분포를 갖도록 한다.

Abstract

The error diffusion technique is frequently utilized for the digital imaging output devices to convert continuous level image into bi-level image. It yields the binary image with the high frequency emphasis that gives a pleasing perception to human eyes. But, due to the non-homogeneous distribution of dots, it exhibits undesirable patterns that degenerate the perceived quality. Various techniques have been proposed to improve the image quality by the error diffusion techniques. In this paper, the cause of non-homogeneity of dot distribution is analyzed first. A threshold modulation technique that employs a simple sinusoidal function is proposed in this paper. The proposed method achieves the homogeneous dot distribution by forcing the minor pixels on the binary image to maintain the principal distance defined according to their gray levels. It also minimizes the void and clusters of minor pixels.

I. 서 론

연속 계조를 표현하는 모니터와는 달리 디지털 프린터 등의 이진 출력 장치에서 영상을 표현하기 위해

* 正會員, 仁荷大學校 電氣工學科

(Department of Electrical Engineering)

※ 본 연구는 98-99 인하대학교 교내 연구비 지원에 의한 결과입니다.

接受日:2000年1月20日, 수정완료일:2000年5月27日

서는 연속 계조 영상을 이진 계조 영상으로 변환하여야 한다. 이와 같이 연속 계조 영상을 이진 계조 영상으로 변환하는 기법을 해프토닝이라 한다^[1]. 해프토닝 기법은 크게 디더링 방법^[1], 오차확산 방법^[1,2], 최적화 기법을 이용한 방법^[3-8] 등으로 구분될 수 있다. 디더링 방법은 이진 계조를 결정하는 이진 문턱값(threshold value)들을 일정한 순서로 배치하여 이진 문턱 배열을 생성한 후 문턱값 배열에 의해 영상을 마스크(masking)하여 이진 영상을 생성하는 방법이다. 오차확산 방법에서는 이진화를 수행한 후에 발생하는 이진화 오차(quantization error)를 주위 화소로 전파하게 된다.

이와 같이 오차값의 전파에 의해 영상의 계조값이 수정되고 수정된 계조값을 이용하여 이진화를 수행한다. 이때 전파하는 오차의 양과 화소값이 수정될 주위 화소의 위치는 오차확산 계수에 의해 정의된다.

최적화 기법을 이용한 방법은 영상의 화질을 나타내는 평가함수(cost function)를 먼저 정의하고 평가함수가 최소가 되도록 최소제곱법^[4,5], 신경회로망^[6], 유전 알고리즘^[7] 등을 이용하여 이진 영상을 생성하는 방법이다. 최적화 기법은 이진 영상을 생성하는데 많은 계산량이 요구되기 때문에 현재는 오차확산 방법의 오차확산 계수를 추정하거나^[7,8] 디터링 방법에서 사용되는 이진 문턱값의 배열을 생성^[12,13]하는 등과 같이 이진화 방법에서 사용되는 요소를 결정하는 도구로 주로 사용되고 있다.

오차확산 방법은 최적화를 이용한 방법에 비해 상대적으로 적은 계산량으로 사람의 시각 특성에 적합한 고주파 성분을 갖는 우수한 화질의 이진 영상을 생성한다. 하지만 특정 계조에서 이진 화소가 균일하게 분포하지 못함으로 인해 눈에 거슬리는 노이즈 형태의 패턴을 발생시키는 문제점이 있다. 구체적으로 밝은 영역에서의 검은점의 분포, 어두운 영역에서 흰점들의 분포가 특정 방향으로 분포되거나 일정 영역에 뭉쳐있는 형태로 분포되어 저주파 성분에 민감한 인간 시각에 거슬리게 보이게 된다.

계조 128을 기준으로 밝은 영역에서의 검은점, 어두운 영역에서의 흰점들은 소수 화소(minor pixel)로 정의된다. 단일 계조 영상에 대한 이진 영상에서의 소수 화소들의 개수는 영상의 크기 혹은 면적이 주어진 경우 단일 계조 영상의 계조값에 의해 결정된다. 또한, 주어진 면적에서의 소수 화소들의 개수가 정해지면 소수 화소들간의 거리 계산이 가능하다. 이와 같이 단일 계조 영상에 대한 이진 영상에서 소수 화소들간의 이상적인 거리를 주 거리(principal distance)라 정의한다. 즉, 균일하지 못한 소수 화소들의 분포란 소수 화소들간의 거리가 주 거리를 만족하지 못한다는 것을 의미한다. 소수 화소들이 뭉쳐있거나(cluster) 공백현상(void)이 발생하는 것을 최소화 함으로서 이진 영상의 화질을 향상시킬 수 있게 된다.

Floyd와 Steinberg^[2]에 의해 최초로 제안된 오차확산 방법의 화질은 이진화 오차를 가중하여 주위 화소에 전파하는 오차확산 계수와 이진 상태를 결정하는 이진화 문턱값에 의해 결정되어진다. 따라서, 기존의 오차확산

방법의 개선을 위한 연구는 Floyd-Steinberg 방법에 대하여 위의 두 가지 요소에 대한 변형을 통하여 이루어졌다. 본 논문에서는 먼저 균일하지 못한 소수 화소들의 분포가 발생하는 원인을 비 대칭적인 오차확산 계수와 이에 따른 이진 오차의 비 대칭적인 분포의 관점에서 분석한다. 또한, 소수 화소들의 균일한 분포를 위해 오차확산 방법 적용시에 주기함수를 통해 이진 문턱값을 조절하는 방법을 제안한다. 제안하는 방법에서 사용된 주기함수는 주 거리를 주기로 하여 소수 화소를 발생하도록 함으로써 소수 화소의 뭉침 현상이나 공백 현상을 최소화하고 균일한 이진 영상을 생성한다. 제안하는 방법은 기존에 균일한 도트 분포를 위해 제안된 이진 문턱값 변조 방법^[15,16]들에서 주위 화소에 대해 연산을 수행하는 것과는 달리 현재 이진화하는 화소값만을 사용한다. 따라서 연산이 간단하며 추가로 소요되는 메모리의 양이 없다.

서론에 이어 2절에서는 일반적인 오차확산 방법에서 눈에 거슬리는 패턴이 발생하는 원인을 비대칭적인 오차확산 계수와 이에 따른 오차의 비대칭적인 분포의 관점에서 분석하고 3절에서는 본 논문에서 제안하는 이진 문턱값 변조 방법에 대해 설명한다. 4절에서는 기존의 오차확산 방법과 제안하는 방법에 의해 결정된 이진 영상을 통해 제안하는 방법의 성능을 분석한다.

II. 기존 오차확산 방법의 분석

Floyd-Steinberg에 의해 최초로 제안된 오차확산 방법^[2]은 고정된 이진화 문턱값으로 화소를 이진화 하는 과정과 이진화를 수행한 후 발생하는 이진화 오차를 주위 화소로 전파하여 주위 화소의 계조값을 수정하는 과정으로 이루어진다. 이때 오차의 전파에 의해 계조값이 수정될 주위 화소의 위치와 오차의 전파 가중치는 오차확산 계수에 의해 결정되어진다. 식 (1)-(3)은 Floyd-Steinberg의 오차확산 방법을 식으로 표현한 것이다.

$$e(m, n) = b(m, n) - u(m, n) \quad (1)$$

$$u(m, n) = x(m, n) - \sum_{(k, l) \in R} w(k, l)e(m-k, n-l) \quad (2)$$

$$b(m, n) = x(m, n) = \begin{cases} 255 & \text{if } u(m, n) \geq T \\ 0 & \text{if } u(m, n) < T \end{cases} \quad (3)$$

위의 식에서 $x(m, n)$ 은 연속 계조 영상의 (m, n) 번

제 화소에서의 계조값이며 $u(m, n)$ 은 오차의 전파에 의해 수정된 계조값이다. R 은 이진화가 수행된 현재 화소에서 발생된 오차를 전파하게될 주위 화소들의 집합을 나타내며, $w(m, n)$ 은 오차확산 계수로서 이진화 오차값 $e(m, n)$ 을 R 의 원소들에 일정 비율로 전파하는 역할을 한다. $b(m, n)$ 은 이진화가 수행된 후의 이진값이며, T 는 이진 문턱값으로 중간 계조인 128의 값을 사용한다. 그림 1은 Floyd-Steinberg 방법의 오차 확산 계수를 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} w(-1, 1) & w(0, 1) & w(1, 0) \\ w(1, 1) & w(1, 1) & w(1, 1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} * & * & 7 \\ 3 & 5 & 1 \end{bmatrix} \times 1/16$$

그림 1. Floyd-Steinberg 오차확산 계수
Fig. 1. Floyd-Steinberg's Error Diffusion Kernel.

연속 계조 영상을 이진 영상으로 변환하는 과정은 필연적으로 이진화 오차를 발생 시킨다. 오차확산 방법에서 오차를 전파하는 과정은 이진화 오차의 저주파 성분을 감소시키는 고역 필터링 기능을 수행한다. 이와 같은 고역 필터링의 기능은 저주파 성분의 노이즈에 민감하게 반응하는 사람의 시각 특성에 부합하여 시각적으로 우수한 이진 영상을 생성한다. 그림 2는 인간 시각의 주파수 특성을 나타낸 것이다^[3]. 오차확산 방법에서 이진화 오차에 대한 고역 필터링 기능은 아래의 식 (4)-(7)에 의해 설명되어 진다^[9]. 식 (1)의 이진화 오차는 식 (2)를 이용하여 식 (4)로 표현되어 진다. 식 (5)는 식 (4)를 푸리에 변환한 것이다.

$$e(m, n) = b(m, n) - [x(m, n) - \sum_{(k, l) \in R} w(k, l)e(m, n)] \quad (4)$$

$$E(u, v) = B(u, v) - X(u, v) + [\sum_{(k, l) \in R} w(k, l) \exp(-j(uk + vl))]E(u, v) \quad (5)$$

식 (5)는 다시 아래의 식 (6)과 (7)로 나타낼 수 있다.

$$B(u, v) = X(u, v) + F(u, v)E(u, v) \quad (6)$$

$$F(u, v) = 1 - \sum_{(k, l) \in R} w(k, l) \exp(-j(uk + vl)) \quad (7)$$

식 (6)은 이진 영상의 주파수 성분이 원 영상의 주파수 성분과 식 (7)로 정의되는 고역 필터에 의해 필터링된 이진 오차의 주파수 성분과의 합으로 구성됨을 나타낸다. 즉, 이진 영상의 주파수 성분은 이진 오차에 대한 필터의 특성에 따라 결정되어 진다. 아래의 그림 3

은 Floyd-Steinberg 오차확산 계수에 대한 $F(u, v)$ 를 나타낸다. 그림 3에서 바다 부분의 등고선은 고역 필터 $F(u, v)$ 를 주파수 평면에 투영한 것으로서 Floyd-Steinberg 오차확산 계수에 의해 정의되는 고역 필터가 비 대칭인 특성을 나타냄을 알 수 있다.

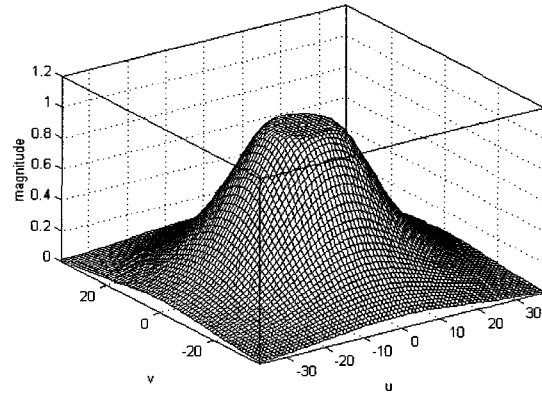


그림 2. 인간 시각 특성 분포
Fig. 2. Human Visual Characteristics.

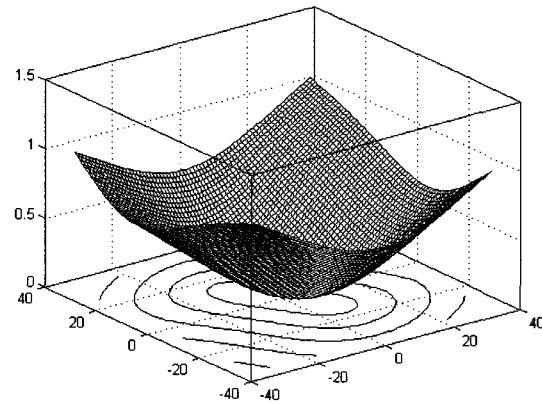
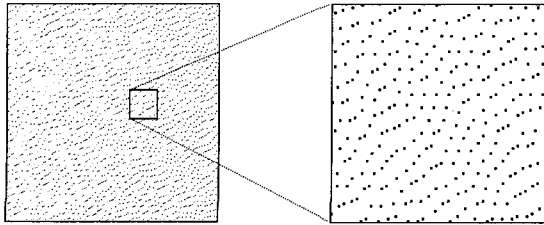


그림 3. 식 (7)의 $F(u, v)$
Fig. 3. $F(u, v)$ in Equation (7).

오차확산 방법은 이진화 오차에 대한 고역 필터링 효과에 의해 시각적으로 우수한 이진 영상을 생성한다. 하지만 특정 계조에서 소수 화소가 균일하게 분포하지 못함으로 인해 눈에 거슬리는 패턴이 발생하게 된다. 그림 4(a)는 계조 245를 갖는 단일 계조 영상에 대해 Floyd-Steinberg 방법을 적용시킨 결과이다. 그림 4(b)는 그림 4(a)의 일부분을 확대한 것이다. 그림 4(b)에서 소수 화소에 해당하는 검은점들이 특정 방향으로 분포됨을 확인할 수 있다.



(a) (b)

그림 4. 단일 계조 영상에 대해 Floyd-Steinberg 방법을 적용한 결과

(a) 레벨 245의 이진 영상 (b) 확대 영상

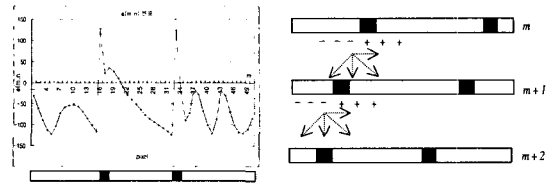
Fig. 4. Binary Image of Level 245 by Floyd-Steinberg's Algorithm.

(a) Constant Image with Level 245

(b) Magnified Version

이와 같이 Floyd-Steinberg 방법에서 소수 화소가 균일하게 분포하지 못하는 원인은 크게 2가지로 요약된다. 첫째로는 이진 오차의 분포가 비 대칭적인 특성을 나타낸다는 사실이며 두번째로는 오차를 전파하는 주위 화소들이 비 대칭적으로 정의되어 있다는 점이다. 그림 5는 계조 245의 단일 계조 영상을 이진화 할 때 발생하는 이진화 오차와 비 대칭적으로 오차를 주위 화소에 전파함으로 인해 나타날 수 있는 소수 화소의 분포를 대략적으로 나타낸 것이다. 그림 5에 나타낸 그래프의 가로축은 m 번째 행에 있는 화소들의 가로 위치를 나타내며 세로축은 오차 $e(m, n)$ 을 나타낸다. 그래프의 아래는 m 번째 행에서 이진화 된 화소들을 나타낸다. 그림 5(a)에서 보듯이 오차 $e(m, n)$ 은 소수 화소를 중심으로 왼쪽에는 음의 값, 오른쪽에는 양의 값을 갖으며 비 대칭적인 분포를 나타낸다. 그림 5(b)는 영상의 $m, m+1, m+2$ 번째 행에서 화소가 이진화 되는 과정을 나타낸 것이다. 그림에서 $+$, $-$ 는 주어진 위치에서의 오차 $e(m, n)$ 의 부호를 나타내며 앞에서 설명하였듯이 오차는 소수 화소인 검은점을 중심으로 반대의 부호를 갖는다. 그림 5(b)에서 m 번째 행에서 발생된 오차는 $m+1$ 번째 행에 있는 화소들의 계조값을 수정한다. 이때 음의 오차는 검은점을 중심으로 왼쪽에 있는 화소의 계조값을 감소시키고 양의 오차는 오른쪽에 있는 화소의 계조값을 증가시킨다. 계조값이 감소된 화소는 검은점으로 이진화 될 확률이 높아지며 계조값이 증가된 화소는 흰점으로 이진화 될 확률이 높아진다. 이러한 이유로 검은점이 그림 4(b)에서와 같이 오른쪽 아래에서 왼쪽 위로 분포되는 결과가 나타

나게 된다.



(a) (b)

그림 5. 단일 계조 이진 영상(245 계조)에서의 오차 분포 예

(a) $e(m, n)$ 의 분포

(b) 비 대칭적인 오차 분포의 영향

Fig. 5. Example of Distribution of $e(m, n)$ on Constant Binary Image of Level 245.

(a) Distribution of $e(m, n)$

(b) Effect of Non-symmetric $e(m, n)$

또한, 그림 5(a)와 같은 오차의 분포는 주위 화소에 대하여 비 대칭적으로 정의된 오차확산 계수에 의해 전파됨으로써 오차의 비 대칭성을 더욱 심화시키게 된다. 즉, 오차확산 계수는 그림 3에서와 같이 오차의 저주파 성분을 비 대칭으로 필터링하여 특정 방향의 저주파 성분이 이진 영상에 나타나는 원인이 된다. 결과적으로 비 대칭적인 오차의 분포와 오차확산 계수는 소수 화소를 비 균일하게 분포하게 하는 원인이 된다. 소수 화소의 분포를 균일하게 개선하기 위해 본 논문에서는 주기 함수를 통해 이진 문턱값을 조절하여 소수 화소들이 일정 거리를 유지하는 방법을 제안한다.

III. 주기 함수를 이용한 문턱값 변조 오차확산 방법

이진 영상의 화질은 이진 화소들의 공간적 분포에 의해 결정되어 진다. 특히 128 계조를 중심으로 밝은 계조에서는 검은점, 어두운 계조에서는 흰점으로 정의되는 소수 화소의 분포는 이진 영상의 화질을 결정하는 중요한 요소가 된다. 소수 화소는 식 (8)과 같이 정의된다.

$$\rho(m, n) = \begin{cases} 0 & \text{if } x(m, n) \geq 128 \\ 255 & \text{if } x(m, n) < 128 \end{cases} \quad (8)$$

일정한 크기를 갖는 단일 계조 영상에 대한 이진 영상에서 이상적인 소수 화소의 개수는 영상의 계조값에 의해 결정되어 진다. 또한, 이진 영상에서 소수 화소가

균일하게 분포할 경우에 소수 화소들간의 거리 계산이 가능하다. 이와 같이 단일 계조 영상에 대한 이진 영상에서 소수 화소들간의 이상적인 거리는 주 거리 (principal distance)라 정의되며 아래의 식 (9)에 의해 계산된다.

$$\lambda_x = \begin{cases} 1/\sqrt{1 - \frac{x(m, n)}{255}} & \text{if } x(m, n) \geq 128 \\ 1/\sqrt{\frac{x(m, n)}{255}} & \text{if } x(m, n) < 128 \end{cases} \quad (9)$$

소수 화소가 균일하게 분포하지 않는 경우 소수 화소들간의 거리가 주 거리를 만족하지 못하여 특정 방향으로 나열되거나 뭉침 현상(cluster) 또는 공백 현상(void)이 발생하게 된다. 오차확산 방법에서 화소의 이진 상태를 결정하는 것은 이진화 오차와 이진 문턱값이다. 이 중에서 이진화 오차는 2절에서 설명하였듯이 비 대칭적으로 분포하여 소수 화소가 일정한 방향으로 나열되게 하는 원인이 된다. 이와 같은 소수 화소들의 비 균일한 분포는 식 (3)에서의 이진 문턱값을 변화시킴으로써 감소시킬 수 있다.

본 논문에서 제안하는 방법을 설명하기에 앞서 간단하게 일차원의 경우에 대하여 설명하기로 한다. 그림 6은 일차원에서 소수 화소가 검은점인 경우 주 거리를 만족하며 분포하는 경우와 그때의 가상적인 이진 문턱값 분포를 개략적으로 나타낸 것이다. 그림 6은 검은점이 주 거리인 λ_x 를 주기로 하여 나타나고 있음을 보여 준다. 이와 같이 검은점이 λ_x 의 주기로 나타나도록 하기 위해서는 이진 문턱값이 λ_x 를 주기로 하여 높은 값을 갖도록 조절되어야 한다. 이를 위하여 본 논문에서는 주 거리 λ_x 를 주기로 하여 변화하는 정현파 함수를 도입한다. 제안하는 이진 문턱값은 아래의 식 (10)과 같이 표현된다.

$$T_x(n) = A \sin(2\pi n / \lambda_x) \quad (10)$$

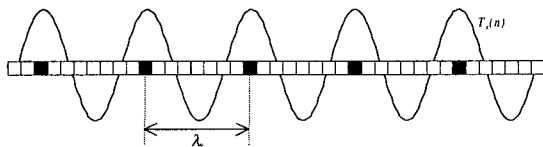


그림 6. 1차원에서의 소수 화소와 주기적인 이진 문턱값의 변화

Fig. 6. Illustration of Minor Pixels and Threshold Value with Periodic Variation in One-dimensional Case.

여기서 상수 A는 주기적으로 소수 화소가 발생하도록 하는 이진 문턱값의 변화폭을 나타내는 상수값이다.

다음에는 본 논문에서 제안하는 방법을 설명하기로 한다. 그림 7은 소수 화소가 2차원상에서 주 거리를 만족하며 분포하고 있는 이상적인 경우를 나타낸 것이다. 그림 7에서 m번째 행에 있는 소수 화소들에 대하여 주 거리 λ_x 를 만족하는 소수 화소들은 동일한 m번째 행이나 $m \pm (\sqrt{3}/2)\lambda_x$ 번째 행에 존재한다. $m \pm (\sqrt{3}/2)\lambda_x$ 번째 행의 소수 화소들은 m번째 행의 소수 화소들에 대해 가로 방향으로 $\lambda_x/2$ 의 거리 차이를 나타낸다. 물론 $m \pm (\sqrt{3}/2)\lambda_x$ 번째 행이란 정수배로 존재하는 인쇄 영역에는 존재하지 않는 가상의 행을 의미한다.

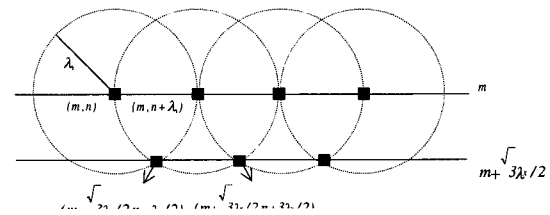


그림 7. 2차원에서의 소수 화소의 이상적인 위치
Fig. 7. Ideal Locations of Minor Pixels in Two-dimensional Space.

아래의 식 (11)은 이차원 영상에 대해 본 논문에서 제안하는 정현파를 이용한 이진 문턱값의 변화를 나타낸다. 주어진 행 m에 대하여 정의되는 $T_x(m, n)$ 은 주기 λ_x 를 갖으며 $m \pm (\sqrt{3}/2)\lambda_x$ 번째 행에서는 m번째 행에 비해 $\lambda_x/2$ 만큼의 위상 차이를 나타내도록 한다.

$$T_x(m, n) = A_x \sin\left\{ \frac{2\pi\left(n - \frac{m}{\sqrt{3}}\right)}{\lambda_x} \right\} \quad (11)$$

$$A_x = A_x^{1.7} \quad (12)$$

식 (12)는 밝은 계조 또는 어두운 계조일수록 값이 증가하는 함수이다. Floyd-Steinberg 방법에서 소수 화소의 공백 영역이 발생하는 현상은 밝은 계조와 어두운 계조일수록 심하게 나타난다. 이러한 이유는 계조값을 수정시키는 오차의 분포가 소수 화소를 발생시킬 수 있는 값으로 느리게 도달하기 때문이다. 이러한 이유로 이진 문턱값의 변화폭은 밝은 계조와 어두운 계조에서 변화폭이 증가하여야 한다. 식 (12)에서 지수 1.7은 실험에 의해 결정하였다.

식 (11)을 이용하여 본 논문에서 제안하는 오차 확산

방법은 아래의 식 (13)-(15)에 의해 표현된다.

$$e(m, n) = b_\lambda(m, n) - u(m, n) \quad (13)$$

$$u(m, n) = x(m, n) - \sum_{(k, l) \in R} w(k, l) e(m-k, n-l) \quad (14)$$

$$b_\lambda(m, n) = \begin{cases} 255 & \text{if } u(m, n) + T_x(m, n) \geq 128 \\ 0 & \text{if } u(m, n) + T_x(m, n) < 128 \end{cases} \quad (15)$$

식 (13)과 (15)에서 $b_\lambda(m, n)$ 은 제안하는 방법에 의해 이진화된 영상을 나타낸다. 제안하는 방법과 식 (1)-(3)의 Floyd-Steinberg 방법은 식 (15)에 표현된 이진화 방법에서만 차이를 나타낸다.

다음에는 본 논문에서 제안하는 방법에 의해 얻어진 이진 영상의 특성을 주파수 영역에서 분석하기로 한다. 즉, 식 (6)의 Floyd-Steinberg 방법에 의한 $B(u, v)$ 와 제안하는 방법에 의해 얻어진 이진영상의 푸리에 변환인 $u_\lambda(m, n) = u(m, n) + T_x(m, n)$ 라 하면 식 (13)-(15)은 아래의 식 (16)-(18)로 변형된다.

$$e_\lambda(m, n) = b_\lambda(m, n) - u_\lambda(m, n) \quad (16)$$

$$u_\lambda(m, n) = x(m, n) - \sum_{(k, l) \in R} w(k, l) e_\lambda(m-k, n-l) \quad (17)$$

$$b_\lambda(m, n) = \begin{cases} 255 & \text{if } u_\lambda(m, n) \geq 128 \\ 0 & \text{if } u_\lambda(m, n) < 128 \end{cases} \quad (18)$$

식 (6)의 유도 과정을 식 (16)-(17)에 적용하면 아래의 식 (19)를 얻게 된다. 또한, 식 (20)은 식 (16)의 푸리에 변환을 나타낸다.

$$B_\lambda(u, v) = X(u, v) + F(u, v)E_\lambda(u, v) \quad (19)$$

$$E_\lambda(u, v) = B_\lambda(u, v) = U_\lambda(u, v) \quad (20)$$

위의 식 (19)와 (20)에 의해 아래의 식 (21)을 얻게 된다.

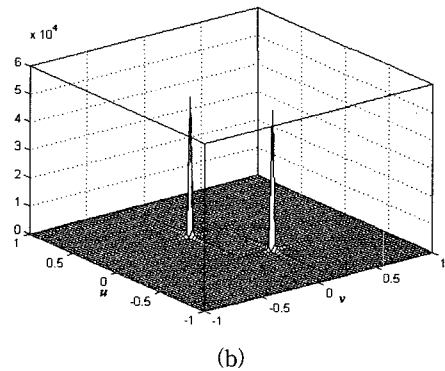
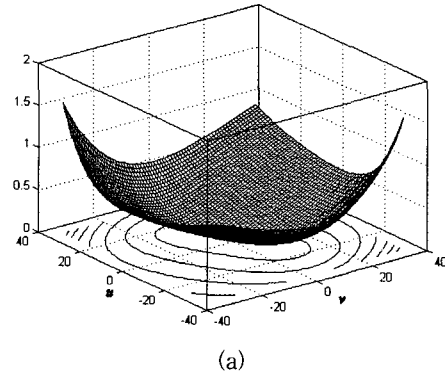
$$B_\lambda(u, v) = \frac{-X(u, v) + F(u, v)U_\lambda(u, v)}{F(u, v) - 1} \quad (21)$$

여기서 $F(u, v)$ 는 식 (7)에 정의된 고역 필터를 나타낸다. 식 (21)에 $u_\lambda(m, n) = u(m, n) + T_x(m, n)$ 의 푸리에 변환식을 대입하여 정리하면 식 (22)로 표현된다.

$$\begin{aligned} B_\lambda(u, v) &= \frac{-X(u, v) + F(u, v)[B(u, v) - E(u, v) + T_x(u, v)]}{F(u, v) - 1} \\ &= \frac{-[X(u, v) + F(u, v)E(u, v)] + F(u, v)B(u, v) + F(u, v)T_x(u, v)}{F(u, v) - 1} \end{aligned}$$

$$= B(u, v) + \frac{F(u, v)}{F(u, v) - 1} T_x(u, v) \quad (22)$$

식 (22)는 제안하는 방법에 의해 얻어진 이진 영상의 주파수 성분이 Floyd-Steinberg 방법에 의한 이진 영상의 주파수 성분 $B(u, v)$ 와 이진 문턱값 변화량 $T_x(u, v)$ 가 필터링된 결과와의 합으로 표현됨을 의미한다. 그림 8(a)는 $T_x(u, v)$ 에 대한 필터인 $F(u, v)/[F(u, v) - 1]$ 를 나타내고 그림 8(b)는 $T_x(u, v)$ 의 주파수 특성을 나타낸 것이다. 그림 8(c)는 $F(u, v)/[F(u, v) - 1] T_x(u, v)$ 의 주파수 특성을 나타낸다. 그림 8(a)는 이진 문턱값에 대한 필터가 고역 필터의 특성을 나타냄을 보여준다. 또한, 그림 8(c)는 제안하는 방법에 의한 이진 영상이 특정 주파수에서 큰 응답을 나타냄을 보여준다. 이때, 특정 주파수란 소수 화소들이 만족하여야 하는 주 거리의 역수인 주 주파수(principal frequency)^[2]와 일치한다. 즉, 제안하는 오차 확산 방법에 의한 이진 영상에서는 소수 화소들이 이상적인 주 거리를 만족하며 분포하게 됨을 주파수 영역에서의 해석에 의해 규명한 것이다. 그림 9는 제안하는 오차 확산 방법의 블록 다이어그램을 나타낸다.



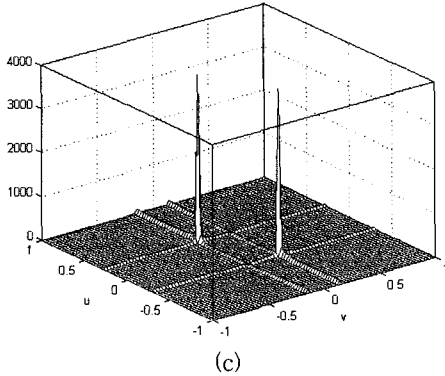


그림 8. 제안하는 방법의 주파수 특성
 (a) $F(u, v)/[F(u, v)-1]$ (b) $T_x(u, v)$
 (c) $\frac{F(u, v)}{[F(u, v)-1]} T_x(u, v)$

Fig. 8. Frequency Characteristics of Proposed Algorithm.

(a) $F(u, v)/[F(u, v)-1]$ (b) $T_x(u, v)$
 (c) $\frac{F(u, v)}{[F(u, v)-1]} T_x(u, v)$

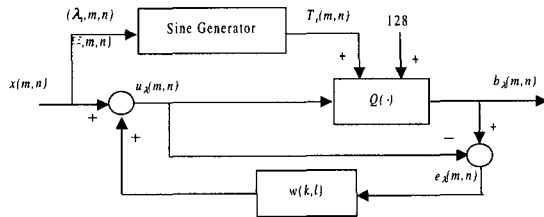


그림 9. 제안하는 오차확산 방법의 블록 다이어그램
 Fig. 9. Block Diagram of Proposed Algorithm.

IV. 실험 및 고찰

본 논문에서 제안하는 오차 확산 방법의 성능을 분석하기 위하여 Floyd-Steinberg 방법과 기존에 균일한 도트 분포를 위하여 제안되었던 이진 문턱값 변조 오차확산 방법인 Eschbach 방법^[15]과의 성능 비교 실험을 수행하였다. 우선 256×256의 크기를 갖는 계조 250과 계조 253의 단일 계조 영상 각각에 대해 제안하는 방법과 Floyd-Steinberg 방법, Eschbach 방법을 적용하여 소수 화소의 분포를 비교하였다. 그림 10과 그림 11은 각각의 방법을 적용한 이진 영상들을 나타낸다.

그림 10과 그림 11에서 제안하는 방법에 의한 이진 영상에서는 소수 화소들의 분포가 기존의 방법에 비해 균일한 분포를 나타냄을 확인할 수 있다. 특히, Eschbach의 방법은 균일한 도트 분포를 얻을 수는 있으나 바람직하지 못한 slow response를 나타내는데 비

하여 제안하는 방법에 의한 결과는 천이(transition)영역에서 공백(void) 현상이 감소됨을 알 수 있다.

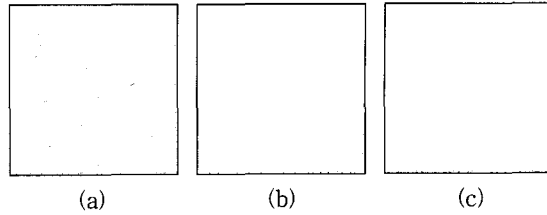


그림 10. 단일 계조 영상(계조 250) 대한 실험 결과
 (a) Floyd-Steinberg 방법 (b) Eschbach 방법
 (c) 제안하는 방법

Fig. 10. Experimental Results for Constant Level 250.

(a) Floyd-Steinberg's Algorithm
 (b) Eschbach's Algorithm
 (c) Proposed Algorithm

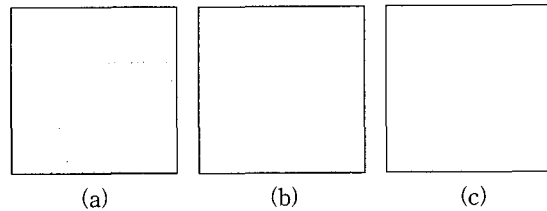


그림 11. 단일 계조 영상(계조 253) 대한 실험 결과
 (a) Floyd-Steinberg 방법 (b) Eschbach 방법
 (c) 제안하는 방법

Fig. 11. Experimental Results for Constant Level 253.

(a) Floyd-Steinberg's Algorithm
 (b) Eschbach's Algorithm
 (c) Proposed Algorithm

소수 화소들의 분포 특성에 의해 결정되는 이진 영상의 주파수 특성을 분석하기 위하여 그림 10에 나타난 계조 250의 단일 계조 영상에 대한 이진 영상들에 대해 radial power spectrum^[11]을 계산하여 그림 12에 나타내었다. 그림 12에서 가로축에 화상표로 표시된 값은 radial power 값이 가장 클 때의 주파수인 주 주파수(principal frequency)^[11]이다. 이상적인 주 주파수는 식 (9)인 주 거리의 역수로 정의되며 계조 250에서의 이상적인 주 주파수는 0.140028이다. 그림 12에서 보듯이 제안하는 방법에 의한 주 주파수가 이상적인 주 주파수를 가장 가깝게 나타냄을 알 수 있다. 이는 제안하는 방법에서 사용하는 이진 문턱값 변화량인 식 (11)에 의해 그림 8(c)와 같이 주 주파수에서 주파수 응답이

큰 신호가 이진 영상의 주파수 특성에 영향을 미쳤기 때문이다.

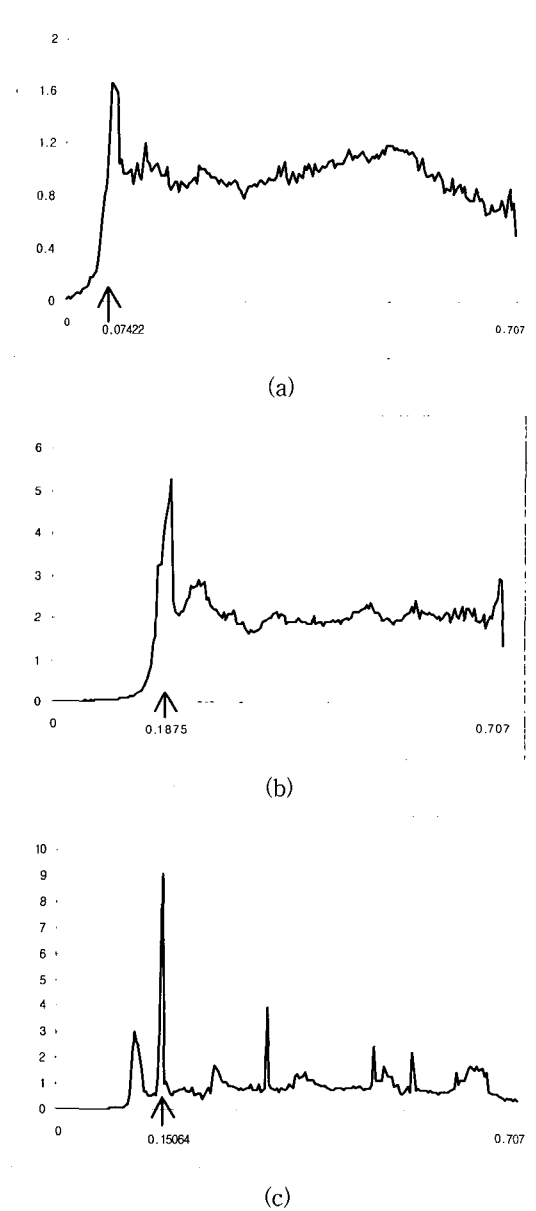


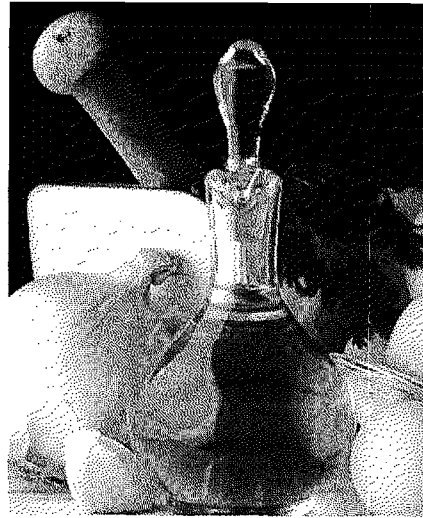
그림 12. 단일 계조(250 계조)에 대한 Radial Power Spectrums

(a) Floyd-Steinberg 방법 (b) Eschbach 방법
(c) 제안하는 방법

Fig. 12. Radial Power Spectrums for Constant Level 250.

(a) Floyd-Steinberg's Algorithm
(b) Eschbach's Algorithm
(c) Proposed Algorithm

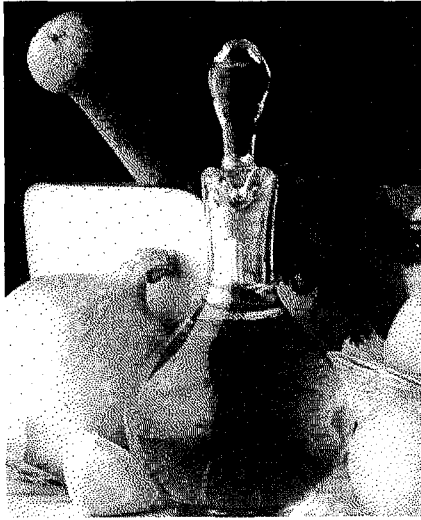
그림 13은 밝은 계조를 갖는 400×510 크기의 영상에 대해 Floyd-Steinberg방법, Eschbach방법 및 제안하는 방법을 적용한 결과이다. 그림 13에서 양파 뒤의 도마에서 나타낸 것처럼 제안하는 방법에 의한 이진 영상에서는 밝은 영역에서 공백 영역이 감소되었음을 확인할 수 있다. 또한, 제안하는 방법에 의해 생성된 이진 영상의 소수 화소들이 일정한 각도를 갖고 분포하고 있음을 알 수 있다. 이러한 분포는 소수 화소가 수직 또는 수평 방향으로 분포하는 것보다 사람의 시각에 적합한 것으로 알려져 있다^[1]. 이와 같이 소수 화소들이 일정한 방향으로 분포될 수 있는 것은 식 (11)에서 제안한 주기 함수가 그림 7에서와 같이 하위 라인에 있는 소수 화소들이 상위 라인에 있는 소수 화소에 대해 $\lambda_x/2$ 의 위상차가 발생하도록 설계 되었기 때문이다.



(a)



(b)



(c)

그림 13. 일반 영상에 대한 실험 결과

- (a) Floyd-Steinberg 방법 (b) Eschbach 방법
(c) 제안하는 방법

Fig. 13. Experimental Results for a Natural Image

- (a) Floyd-Steinberg's Algorithm
(b) Eschbach's Algorithm
(c) Proposed Algorithm

V. 결 론

본 논문에서는 정현파 함수를 이용한 이진 문턱값 변화를 통해 이진 영상의 화질을 향상시키는 방법을 제안하였다. 입력 계조에 따라 소수 화소들 간에 유지되어야 할 이상적인 거리인 주 거리를 정현파 함수의 주기로 사용하였다. 이와 같이 주 거리를 주기로 하는 정현파 함수는 소수 화소들이 주 거리를 주기로 하여 발생하도록 유도함으로써 소수 화소들간의 거리가 일정하게 유지되는 균일한 이진 영상을 생성한다. 행별로 정현파 함수의 위상을 달리하여 인간 시각 특성에 적합하게 소수 화소들이 분포하도록 하였다. 또한, 제안하는 방법의 특성을 주파수 영역에서 분석하였다. 제안하는 방법은 기존의 이진 문턱값 변조 방법들이^[15,16] 주위 화소에 대해 이진 문턱값을 전파하고 변화된 문턱값을 사용하기 위해 이진 문턱값을 저장하는 과정을 요구하는데 반하여 이진화를 수행하는 화소의 계조값만을 사용함으로써 계산이 간단하며 이진 문턱값 저장을 위한 메모리가 필요치 않다.

참 고 문 헌

- [1] R. A. Ulichiney, *Digital Halftoning*, MIT Press, 1987.
- [2] R. W. Floyd and L. Steinberg, "An adaptive algorithm for spatial grey-scale," *Proc. Soc. Inf. Disp.* 17, pp. 75-77, 1976.
- [3] J. Sullivan, L. Ray and R. Miller, "Design of Minimum Visual Modulation Halftone Patterns," *IEEE Trans. on System, Man and Cybernetics*, Vol. 21 No. 1, pp. 34-39, Jan./Feb. 1991.
- [4] P. W. Wong, *Error Diffusion With Dynamically Adjusted Kernel*, *IEEE Int. Conf. on ASSP*, pp. V.113-V.116, April 1994.
- [5] K. M. Kang, S. W. Kang, and C. W. Kim, "A modified error diffusion scheme based on the human visual model," *Recent Progress in Digital Halftoning II*, *SPIE*, pp. 30-34, 1999.
- [6] S. Kollias and D. Anastassiou, "A unified neural network approach to digital image halftoning," *IEEE Tans. on Signal Processing*, Vol. 39, No.4, pp. 980-984, 1991.
- [7] S. H. Park, K. M. Kang, and C. W. Kim, "Estimation of error diffusion kernel using genetic algorithm," *SPIE Vol. 3300*, pp. 330-340, 1998.
- [8] K. M. Kang and C. W. Kim, "A non-causal error diffusion method for edge enhancement," *SPIE Vol. 3018*, pp. 255-265, 1997.
- [9] Z. Fan, "Error Diffusion with a More Symmetric Error Distribution," *SPIE Vol. 2179*, pp. 150-158, 1994.
- [10] K. T. Knox, "Error image in error diffusion," *SPIE Vol. 1657*, pp. 168-179, 1992.
- [11] J. N. Shiau and Z. Fan, "A Set of easily Implementable Coefficients in Error Diffusion with Reduced Worm Artifacts," *SPIE Vol. 2658*, pp. 222-225, 1996.
- [12] T. Mitsa and K. J. Parker, "Digital halftoning technique using a blue noise mask," *Proc. of IEEE Int. Conf. Commun.*

- pp. 26-1126-15, 1997.
- [13] R. A. Ulichney, "The void-and-cluster method for dither array generation," SPIE Vol. 1913, pp. 332-343, 1993.
- [14] R. Eschbach and K. T. Knox, "Error diffusion algorithm with edge enhancement," J. of Opt. Soc. Am.A, Vol.8, No. 12, pp. 1844-1850, Dec., 1991.
- [15] R. Eschbach, "Error diffusion algorithm with homogeneous response in highlight and shadow areas," J. of Electronic Imaging 6(3), pp. 348-356, 1997.
- [16] D. U. Hong and C. W. Kim, "A serpentine error diffusion kernel with threshold modulation for homogeneous dot," PPIC/JH'98, pp. 363-366, 1998.

 저자 소개



姜琦珉(正會員)

1995년 2월 인하대학교 전기공학과 학사. 1997년 2월 인하대학교 전기공학과 석사. 현재 인하대학교 전기공학과 박사과정. 주관심 분야는 영상 해프토닝, 영상 출력장치에서의 칼라 보정



金權宇(正會員)

1983년 2월 서울대학교 제어계측공학과 학사. 1985년 12월 Purdue 대학교 전기공학과 석사. 1989년 8월 Purdue 대학교 전기공학과 박사. 1989년 8월~1994년 2월 Graphic Research Lab., 3M, Senior Research Engineer. 1994년 3월~현재 인하대학교 전기공학과 부교수. 주관심 분야는 영상 입출력 장치를 위한 영상 처리