

論文2001-38SP-1-1

# 주거리 기반의 오차확산 방법 (An Error Diffusion Technique Based on Principal Distance)

姜 奇 珉 \* , 金 椿 宇 \*

(Ki-Min Kang and Choon-Woo Kim)

## 요 약

디지털 프린터와 같은 이진 출력 장치에서 영상을 표현하기 위해서는 연속 계조 영상을 이진 영상으로 변환하는 헤프토닝 기법이 요구된다. 본 논문에서는 이진화 된 영상에서 균일한 도트들의 분포를 얻기 위하여 새로운 오차확산 방법을 제안한다. 제안하는 방법에서는 먼저, 현재 이진화 하려는 화소와 이미 이진화 된 소수화소(minor pixel)들간의 최소거리를 '최소화소거리(minimum pixel distance)'라 정의한다. 또한, 오차확산방법에의 적용을 위하여 계조값을 새로운 주거리 기반의 변수로 변환한다. 기존의 오차확산 방법에서는 이진화에 따르는 계조값의 차이를 주위 화소들에 전파하는데 반하여 제안하는 방법에서는 주거리상의 차이가 전파된다. 이진화 과정에서는 최소화소거리가 문턱치로 사용된다. 본 논문에서는 최소화소거리를 계산하는 방법으로 'MPOA'(Minor Pixel Offset Array)를 제안한다. MPOA는 이미 이진화 된 영역의 이진 화소의 종류와 2차원상의 위치를 1차원으로 표현하는 기법으로서 최소화소거리의 계산에 필요한 메모리와 계산량을 크게 감소시킨다.

## Abstract

In order to generate the gray scale image by the binary state imaging devices such as a digital printer, the gray scale image needs to be converted into the binary image by the halftoning techniques. This paper presents a new error diffusion technique to achieve the homogeneous dot distributions on the binary images. In this paper, 'the minimum pixel distance' from the current pixel under binarization to the nearest minor pixel is defined first. Also, the gray levels of the input image are converted into a new variable based on the principal distance for the error diffusion. In the proposed method, the difference in the principal distances is utilized for the error propagation, whereas the gray level difference due to the binarization is diffused to the neighboring pixels in the existing error diffusion techniques. The quantization is accomplished by comparing the updated principal distance with the minimum pixel distance. In order to calculate the minimum pixel distance, MPOA(Minor Pixel Offset Array) is employed to reduce the computational loads and memory resources.

## I. 서 론

\* 正會員, 仁荷大學校 電氣工學科

(Dept. of Electrical Engineering Inha University)

※ 본 연구는 99-00 정보통신 우수대학원 지원에 의한  
결과입니다

接受日字:2000年6月5日, 수정완료일:2000年11月28日

이진 출력 장치를 이용하여 영상을 표현하기 위해서는 연속 계조 영상(gray scale image)을 이진 영상(binary image)으로 변환하여야 한다. 이와 같이 연속 계조 영상을 이진 영상으로 변환하는 기법을 이진화

기법(halftoning)<sup>[1]</sup>이라 한다. 이진화 기법은 크게 디더링 방법<sup>[1]</sup>, 오차확산 방법<sup>[2]</sup>, 최적화 기법을 이용한 방법<sup>[3-8]</sup> 등으로 구분될 수 있다. 이진 영상을 생성하는 이진화 기법의 성능은 원 영상의 계조를 표현하는 계조의 재현성, 이진 영상에서의 잡음의 정도, 경계선의 재현성 및 인간 시각 특성<sup>[3]</sup>에 적합한 이진 화소들의 분포 특성 등에 의해 좌우된다. 이들 중에서 특히 밝은 계조에서의 검은점, 어두운 계조에서 흰점으로 정의되는 소수화소(minor pixel)들의 균일한 분포 특성은 이진 영상의 화질에 큰 영향을 미친다.

현재 가장 널리 사용되는 오차확산 방법은 화소를 이진화 한 후에 발생하는 이진화 오차를 주위 화소들의 이진화에 고려토록 하여 평균적으로 이진화 오차를 최소화 함으로써 원 영상의 계조를 표현한다. 또한 오차확산 방법은 이진화 오차에 대한 고역 필터링 과정<sup>[9]</sup>을 통해 저주파 성분에 민감한 인간 시각에 적합하도록 이진 영상을 생성한다. 하지만 오차확산 방법은 이진화 오차의 전파 과정만으로는 밝은 계조와 어두운 계조에서 균일한 분포를 생성하는데 한계가 있다. 따라서 이진문턱값 전파 방법<sup>[15,16]</sup>, roadmap방법<sup>[17]</sup>, 또는 주기함수를 이용한 이진 문턱값 변조 방법<sup>[20]</sup> 등과 같이 추가적인 연산과정을 통해 균일한 도트 분포를 얻는 방법들이 발표된 바 있다.

이진 문턱값 전파 방법<sup>[15,16]</sup>은 이진화 오차를 주위 화소로 전파하는 과정과 유사하게 입력 화소의 계조와 이진화 결과에 따라 threshold imprint를 가중하여 주위 화소로 전파함으로써 이진 문턱값을 변화시키는 방법이다. 이진 문턱값 전파 방법은 전파 과정의 추가로 인해 계산량이 증가하게 되며 이진 문턱값의 변화가 이진화 된 주위 화소들의 분포를 정확히 반영하지 못하기 때문에 특정 계조에서 균일하지 못한 분포가 발생하게 된다.

Roadmap 방법<sup>[17]</sup>에서는 먼저 전체 계조들을 오차확산에 의해 이진화 할 중간 계조와 도트 분포에 민감한 나머지 계조의 두 가지로 구분한다. 도트 분포가 중요한 밝은 또는 어두운 계조를 갖는 화소들을 이진화 할 때에는 계조값에 따라 이미 이진화 된 영역에 대하여 소수화소의 유무를 검색한다. 그 결과 검색 범위 내에 소수화소가 존재하지 않을 경우에 한해서 현재 이진화 하려는 화소가 소수화소로 이진화 된다. 반면에 중간 계조의 화소들에 대해서는 기존의 오차확산 방법과 동일한 과정에 의해 이진 화소를 결정한다. Roadmap 방

법에서는 최대 검색 범위 (16라인 메모리)에 해당하는 이진 영상을 모두 저장해야 한다.

주기함수를 이용한 방법<sup>[20]</sup>은 계조에 따라 균일 분포를 위한 소수화소들의 주거리를 주기함수의 주기로 정의하여 문턱값을 변화시키는 방법이다. 주기함수를 이용한 방법은 현재 이진화를 수행하는 화소의 계조값만으로 이진 문턱값을 결정하기 때문에 계산량의 증가가 거의 없으나 소수화소들의 위치를 정확히 고려하지 않기 때문에 특정 계조에서 눈에 거슬리는 소수화소의 분포가 발생하게 된다.

본 논문에서는 영상의 계조에 따라 소수화소들이 일정한 거리를 유지함으로써 균일한 분포를 생성하는 이진화 방법을 제안한다. 이를 위해 본 논문에서는 균일한 분포를 위한 소수화소들간의 이상적인 거리를 주거리(principal distance)라 정의하며 이진화 하려는 화소와 이진화 된 소수화소들간의 가장 가까운 거리를 '최소화소거리'(minimum pixel distance)라 정의한다. 영상의 일정 영역에서 주거리와 최소화소거리가 평균적으로 같아지도록 하기 위하여 먼저 입력 연속 계조 영상의 계조값을 새로운 주거리 기반의 변수로 변환하는 방법을 제시한다. 기존의 오차확산 방법에서는 이진화에 따르는 계조값의 차이를 주위 화소들에 전파하는데 반하여 제안하는 방법에서는 주거리상의 차이가 전파된다. 제안하는 방법에서는 오차확산 커널에 의해 수정된 주거리가 최소화소거리보다 클 경우에만 소수화소로 이진화 하여 소수화소들간의 거리가 평균적으로 주거리를 나타내도록 한다.

최소화소거리를 계산하기 위해서는 Roadmap방법<sup>[17]</sup>에서와 마찬가지로 현재 이진화를 수행하는 화소로부터 최대 주 거리에 해당하는 상위 16라인의 모든 화소에 대해 이진 화소의 종류와 2차원상에서의 위치를 저장해야 한다. 하지만, 본 논문에서는 최소화소거리를 효과적으로 계산하기 위한 방법으로 'MPOA'(Minor Pixel Offset Array)기법을 제안한다. MPOA는 이미 이진화 된 영역에서 소수화소의 종류와 위치를 1차원으로 저장하여 영상의 한 라인에 해당하는 메모리만으로 최소화소거리를 결정하는 방법이다.

2절에서는 먼저 기존의 오차확산 방법에 대해 설명하고 제안하는 주거리 기반 오차확산 방법을 자세히 설명한다. 3절에서는 적은 계산량과 메모리량으로 최소화소거리를 계산하는 기법인 MPOA 방법에 대해 설명한다. 4절에서는 제안하는 방법의 성능을 기존에 제안

된 이진화 방법들의 결과와 비교 평가하며 5절에서 제안한 방법에 대한 결론을 도출한다.

II. 제안하는 주거리 기반 오차확산 방법

본 논문에서 제안하는 방법을 설명하기에 앞서 기존의 오차확산 방법과의 차이를 비교하기 위해 기존의 오차확산 방법을 간략히 요약한다. 오차확산 방법은 [0,255]의 연속 계조를 갖는 화소를 0 또는 255로 이진화 한 후에 발생하는 이진화 오차를 주위 화소로 전파하여 다음 화소의 이진화 시에 고려토록 하는 방법이다. 식 (1)-(3)은 일반적인 오차확산 방법<sup>[1,2]</sup>을 나타낸다.

$$e(m, n) = u(m, n) - b(m, n) \tag{1}$$

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

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

위의 식에서  $x(m, n)$ 은  $(m, n)$ 번째 화소에서의 연속 계조값이며  $w(k, l)$ 은 오차확산 계수로서 이진화에 따른 오차값  $e(m, n)$ 을  $R$ 에 정의된 주위 화소들에 일정한 비율로 전파하는 역할을 한다. 식 (3)에서  $T$ 는 이진 화소를 결정하는 이진 문턱값으로서 일반적으로 상수값인 128이 사용된다.

오차확산 방법은 선형으로 변화하는 연속 계조를 이진화 할 때 발생하는 오차를 식 (2)와 같이 선형 모델에 의해 주위에 확산시킴으로서 평균적으로 이진화 오차를 최소화 하는 방법이다. 식 (1)-(3)의 오차확산 방법에 의해 얻어진 이진 영상은 원 영상의 계조를 비교적 정확히 표현하는 반면 영상의 밝은 부분이나 어두운 부분에서는 도트 분포가 균일하지 못하여 눈에 거슬리는 패턴이 발생하게 된다. 이러한 패턴은 소수화소라 정의되는 밝은 영역에서의 검은점, 어두운 영역에서의 흰점들이 균일하게 분포하지 못하여 발생하게 된다. 균일한 도트 분포를 갖는 이진 영상을 생성하기 위한 소수화소들간의 이상적인 거리는 주거리라 정의되며 아래의 식 (4)로서 표현된다. 그림 1은 식 (4)에 나타난 계조별 주거리를 그래프로 나타낸 것이다. 주거리는 계조 128에 대하여 대칭이므로 128부터 255계조 사이만을 나타내었다.

$$\lambda_x = \begin{cases} 1/\sqrt{1 - \frac{x(m, n)}{255}} & \text{if } x(m, n) \geq 128 \\ 1/\sqrt{\frac{x(m, n)}{255}} & \text{if } x(m, n) < 128 \end{cases} \tag{4}$$

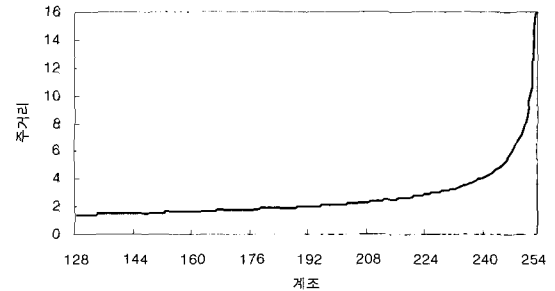


그림 1. 계조별 주거리  
Fig. 1. Plot of Principal Distance vs Gray Level.

단일 계조 영상을 이진화 할 경우 이상적으로는 이진 영상내의 모든 소수화소간의 거리가 주어진 계조에 대한 주거리와 일치하여야 한다. 이와 같은 조건을 만족할 때 이진 영상은 균일한 도트 분포를 형성하며 주어진 계조를 재현하게 된다. 그러나, 디지털 프린터의 경우 격자상의 위치에만 도트를 인쇄하기 때문에 소수화소들간의 거리는  $1, \sqrt{2}, 2\sqrt{5}$  등과 같이 제한된 값만을 갖게 된다. 따라서, 0과 255사이의 모든 계조에 대하여 이진 영상내의 소수화소간의 거리가 그림 1에 나타난 주거리와 일치시키는 것은 불가능하다. 따라서 본 논문에서는 오차확산 방법을 통해 이진 영상의 일정 영역에서 소수화소간의 거리가 평균적으로 주거리를 나타내도록 하는 방법을 제안한다. 이를 위하여 먼저 아래의 식 (5)와 같이 주거리 기반의 새로운 변수  $v_x(m, n)$ 을 정의한다.

$$v_x(m, n) = \frac{x(m, n)}{8} - 16 \tag{5}$$

식 (5)에서 정의된  $v_x(m, n)$ 은 원점을 지나는 직선의 형태를 갖는다.  $x(m, n) > 128$  경우에는 양수값을 반대의 경우에는 음수값을 갖는다.  $v_x(m, n)$ 의 최대값은 계조 255에 대한 주거리를 나타낸다. 식 (1)-(3)에 나타난 기존의 오차확산 방법은 계조값  $x(m, n)$ 에 대하여 정의되는데 반하여 본 논문에서 제안하는 주거리 기반의 오차확산 방법은  $v_x(m, n)$ 에 대하여 정의된다. 제안하는 오차확산 방법은 식 (6)-(10)으로 표현된다.

$$e_b(m, n) = v_x'(m, n) - v_b(m, n) \quad (6)$$

$$v_x'(m, n) = v_x(m, n) + \sum_{(k, l) \in R} w(k, l) e_b(m-k, n-l) \quad (7)$$

$$b(m, n) = \begin{cases} 255 & \text{if } v_x'(m, n) > d_{\min}(m, n) \\ 0 & \text{if } v_x'(m, n) \leq d_{\min}(m, n) \end{cases} \quad (8)$$

$$d_{\min}(m, n) = \begin{cases} d_{\min}^B(m, n) & \text{if } x(m, n) \geq 128 \\ -d_{\min}^W(m, n) & \text{if } x(m, n) < 128 \end{cases} \quad (9)$$

$$v_b(m, n) = \begin{cases} v_{255}(m, n) & \text{if } b(m, n) = 255 \\ v_0(m, n) & \text{if } b(m, n) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

제안하는 방법에서 이진화에 따른 오차는 식 (6)의  $e_b(m, n)$ 로 정의되며 이는 식 (7)의  $v_x(m, n)$ 값과 식 (10)에 나타난 것과 같이 흰점 또는 검은점에 해당되는  $v_x(m, n)$ 값인  $v_b(m, n)$ 의 차이로서 계산된다. 이와 같이 정의된 오차는 식 (7)에 의해 주위 화소로 전파되고 다음에 이진화 할 화소에서의  $v_x(m, n)$ 을 수정하게 된다. 식 (7)에서  $w(k, l)$ 은 오차확산 계수를 나타낸다.

식 (9)의  $d_{\min}^B(m, n)$ 과  $d_{\min}^W(m, n)$ 은 각각  $x(m, n) \geq 128$ 과  $x(m, n) < 128$ 인 경우의 최소화거리를 나타낸다. 최소화거리란 현재 이진화하려는 화소  $x(m, n)$ 과 이미 이진화 된 소수화소들간의 거리들 중에서 최단

거리를 나타낸다. 즉,  $x(m, n) \geq 128$ 일 경우 소수화소는 검은 점이며  $d_{\min}^B(m, n)$ 은 이미 검은점으로 이진화된 점들 중에서  $x(m, n)$ 과 가장 가까운 검은점과의 거리를 나타낸다. 반대로  $x(m, n) < 128$  경우인  $d_{\min}^W(m, n)$ 은 가장 가까운 흰점과의 거리를 나타낸다. 최소화거리를 효율적으로 계산하는 방법은 다음 절에 자세히 설명하기로 한다. 이진화는 식 (8)에 의해 수행된다. 식 (8)에 나타난 이진화 과정을 그림 2를 이용하여 자세히 설명하기로 한다.

그림 2에서 먼저  $x(m, n)$ 이 230이라고 가정한다. 이 때에 소수화소는 검은점이 되며 검은점들간의 거리가 평균적으로 주거리를 나타내도록 하여야 한다. 그림 2(a)는 최소화거리  $d_{\min}^B(m, n)$ 이 수정된  $v_x(m, n)$ 값 보다 작은 경우를 나타낸다. 이 경우에는  $x(m, n)$ 은 흰점으로 이진화 된다. 즉, 최소화거리가 주거리보다 작은 경우라 여겨 검은점을 인쇄하는 것을 유보하는 것이다. 이진화 결과 발생하는 오차는 식 (7)에 의해 주위 화소들에 전파된다. 그림 2(b)는 최소화거리  $d_{\min}^W(m, n)$ 이 수정된  $v_x(m, n)$ 값 보다 큰 경우를 나타낸다. 이 경우  $x(m, n)$ 은 검은점으로 이진화 되고 그 차이는 마찬가지로 식 (7)에 의해 전파된다.

지금까지 설명한 오차확산 방법은 오차의 전파 과정을 통해 소수화소들간의 거리가 평균적으로 주거리를 나타내어 영상의 밝은 영역과 어두운 영역에서 균일한 도트 분포를 생성하게 된다. 다음에는 최소화거리를 효율적으로 계산하는 방법을 자세히 설명하기로 한다.

### III. MPOA를 이용한 최소화거리 계산

본 논문에서 제안하는 방법은 매 화소마다 최소화거리의 계산을 필요로 한다. 최소화거리를 계산하기 위해서는 최대 주거리인 상위 16라인에 해당되는 영역에 대하여 이미 이진화 된 화소의 종류와 2차원상의 위치를 저장해야 한다. 실제 최소화거리는 저장된 영역내에서의 소수화소들을 검색하고 소수화소들과 현재의 위치간의 *Euclidean* 거리들을 계산하며 계산된 거리들 중에서 최소인 거리를 선택함으로써 결정한다. 이와 같은 과정은 16라인이라는 많은 메모리를 필요로 하며<sup>[17,18]</sup> 2차원 영역의 모든 소수화소에 대해 *Euclidean* 거리를 계산하기 때문에 많은 계산량을 요구한다<sup>[18]</sup>.

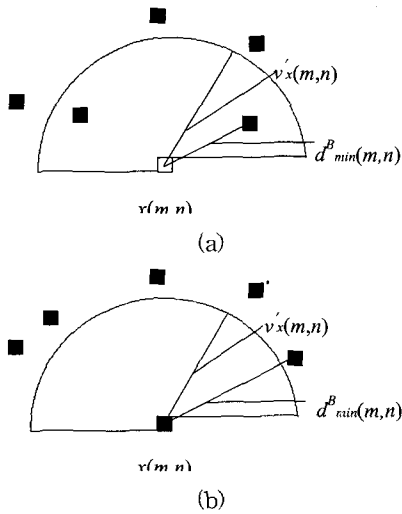


그림 2. 이진화 방법

(a)  $d_{\min}^B(m, n) < v_x'(m, n)$ 인 경우

(b)  $d_{\min}^B(m, n) \geq v_x'(m, n)$ 인 경우

Fig. 2. Quantization Method.

(a) Case of  $d_{\min}^B(m, n) < v_x'(m, n)$

(b) Case of  $d_{\min}^B(m, n) \geq v_x'(m, n)$

본 논문에서는 이진화된 영역에서의 소수화소의 종류와 위치를 1차원으로 변환하여 저장함으로써 최소화소거리 계산에 요구되는 메모리량과 계산량을 감소시키는 방법을 제안하며 이를 MPOA(Minor Pixel Offset Array)라 부르기로 한다. 아래의 그림 3을 예로 들어 제안하는 MPOA방법을 설명하기로 한다. 그림 3(a)는  $M \times N$  크기의 영상에 대한 이진 영상의 일부를 나타내고 현재 이진화하려는 화소는  $(m, n)$ 번째 화소이다. 그림 3(a)에서 검은 영역은 계조 0, 흰 영역은 계조 255를 갖는 소수화소들을 나타낸다. 소수화소들의 2차원상의 위치 정보는  $po(k)$ 라는 1차원 어레이로 코드화된다.  $po(k)$ 는  $(N+1)$ 개의 원소로 구성된다. 처음의  $N$ 개는 1부터  $N$ 번째 열에서의 소수화소들의 위치를 표현하며  $po(N+1)$ 은 현재 처리하려는 화소와 같은 행에서의 소수화소들의 위치 정보를 표현한다. 처음의  $N$ 개의  $po(k), (k=1, 2, \dots, N)$ 는 다음과 같이 결정된다. 직전 행인  $(m-1)$ 번째 행의 원소가 흰점일 경우에는 윗 방향으로 연속적으로 위치한 흰점의 개수가  $po(k)$ 값이 된다. 반대로 직전 행인  $(m-1)$ 번째 행의 원소가 검은점일 경우에는 윗 방향으로 연속적으로 위치한 검은점의 개수를 음수로 취한 값이  $po(k)$ 값으로 된다. 마지막 원소인  $po(N+1)$ 은 직전 원소인  $b(m, n-1)$ 이 흰점일 경우는 왼쪽 방향으로 연속적으로 존재하는 흰점의 개수가  $po(N+1)$ 값이 된다.  $b(m, n-1)$ 이 검은점일 경우에는 왼쪽 방향으로 연속적으로 존재하는 검은점의 개수를 음수로 취한 값이  $po(N+1)$ 값으로 된다.

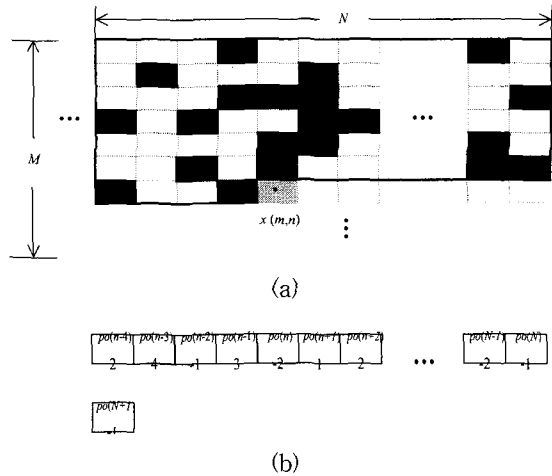


그림 3. 이진 영상의 일부와 이에 대한  $po(k)$   
 (a) 이진 영상의 일부 (b)  $po(k)$ 의 값  
 Fig. 3. A Part of Binary Image and  $po(k)$   
 (a) A Part of Binary Image  
 (b) Values of  $po(k)$

그림 3(b)는 그림 3(a)의 이진화 된 영역에 대한  $po(k)$ 값을 나타낸다. 예를 들어  $po(n-4)$ 의 경우 그림 3(a)에서 보듯이  $b(m-1, n-4)$ 은 흰점이며 윗 방향으로 검은 점  $b(m-3, n-4)$ 을 만날 때까지 2개의 흰점이 연속해서 존재하므로 그 값은 +2이다. 또한,  $po(n-2)$ 의 경우  $b(m-1, n-2)$ 이 검은점이고 바로 위의  $b(m-2, n-2)$ 은 흰점이므로  $po(n-2)$ 의 값은 1이다.

최소화소거리 결정은  $po(k)$  각각에 대해 가장 가까

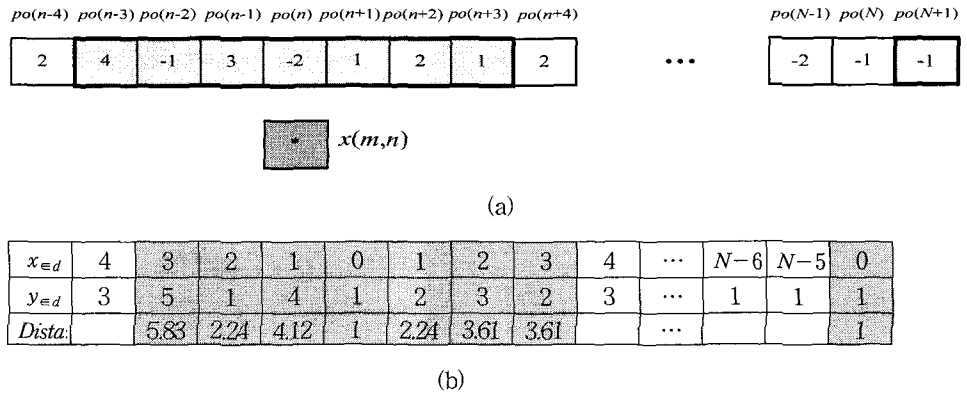


그림 4. 최소화소거리 계산방법의 예 ( $x(m, n) = 230, x = 3.19, [x] = 3$ )  
 (a)  $po(k)$  (b)  $po(k)$ 를 이용한 최소화소거리 계산  
 Fig. 4. An Example of Calculation for Minimum Pixel Distance  
 ( $x(m, n) = 230, x = 3.19, [x] = 3$ )  
 (a)  $po(k)$  (b) Calculation of Minimum Pixel Distance with  $po(k)$

운 소수화소의 거리를 계산한 후 이들 중 가장 작은 값을 선택하는 과정으로 이루어진다. 이때 소수화소들의 거리를 계산하기 위해서는 이진화 하려는 화소  $x(m, n)$ 으로부터 소수화소까지의  $x$ 축 방향의 편차  $x_{\in d}$ 와  $y$ 축 방향의 편차  $y_{\in d}$ 를 우선 결정해야 한다. 이에 필요한 과정들을 그림 4를 이용하여 설명하기로 한다.

그림 4에서 현재 이진화하려는 화소의 계조값은 230이라 가정한다. 계조값 230에 해당하는 주거리는 3.19이다. 주어진 화소  $x(m, n)$ 에 대하여  $po(k)$ 값들이 결정된 후에는  $x(m, n)$ 에 해당되는 주거리에 따라  $po(k)$  내의 검색 범위가 결정된다. 즉, 현재 이진화 하려는 화소를 중심으로  $(2[x]+2)$ 개의  $po(k)$ 값만이 검색 대상이 된다. 이는 그림 4(a)에 굵은 선으로 표시된 부분을 나타낸다. 그림 4(b)는 그림 4(a)에 나타난 검색 대상에 대하여  $x$ 축과  $y$ 축 방향의 편차인  $x_{ind}$ 와  $y_{ind}$ 를 나타낸 것이다. 표 1은  $po(k)$ 로부터  $x_{ind}$ 와  $y_{ind}$ 를 계산하는 규칙을 보여준다. 그림 4(b)에서 마지막 줄의 값은 부분이 검색 영역 내에서의 *Euclidean* 거리를 나타낸다. 계산된 거리들 중에서 최단거리인 1이  $x(m, n)$ 에 대한 최소화소거리이다. 그림 4(b)의 *Euclidean* 거리는 매번 계산할 필요없이 가능한  $x_{ind}$ 와  $y_{ind}$ 값들로부터 계산되어지는 거리를 LUT에 미리 저장할 수 있다. 따라서 최소화소거리는 비교 연산만으로 결정하게 된다. 또한, 다음 화소에 대한  $po(k)$ 값들은 다시 계산하지 않고 변화되는 부분만 수정하여 얻게 된다. 즉, 그림 3(a)에서  $(m, n)$ 번째 화소를 이진화 하였을 때 현재 이진화가 수행되는  $m$ 번째 행에서의 가장 가까운 소수화소의 위치를 나타내는  $po(N+1)$ 만이 변하게 된다. 그림 3의 예에서  $(m, n)$ 번째 화소가 검은점으로 이진화 되었을 경우  $po(N+1)$ 은 3의 값으로 수정되며 흰점으로 이진화 되었을 경우에는 1의 값으로 수정된다.

표 1.  $po(k)$ 로부터  $x_{ind}$ ,  $y_{ind}$ 의 계산 규칙  
Table 1. Rules of Calculating  $x_{ind}$  and,  $y_{ind}$  from  $po(k)$ .

		$po(k), k=1, 2, \dots, N+1$	
		$x_{ind}$	$y_{ind}$
$x(m, n) \geq 128$	$ n-k $	1	if $po(k) < 0$
		$po(k) + 1$	if $po(k) \geq 0$
$x(m, n) < 128$	$ n-k $	$ po(k)  + 1$	if $po(k) < 0$
		1	if $po(k) \geq 0$

#### IV. 실험 결과

제안하는 방법의 성능을 분석하기 위하여 기존에 균일한 도트 분포를 얻기 위해 제안된 세 가지 방법들<sup>[15,17,20]</sup>과 비교 실험을 수행하였다. 먼저 제안하는 방법에 의해 얻어진 이진 영상에서 소수화소들 간의 거리가 주거리와 얼마나 일치하는지를 실험하였다. 이 실험의 목적은 균일한 도트 분포의 정도를 수치적으로 평가하기 위한 것이다. 128부터 255의 계조 각각에 대하여  $256 \times 256$ 의 크기를 갖는 단일 계조 영상을 생성하였다. 각각의 단일 계조 영상을 제안하는 방법과 기존의 세 가지 방법에 의해 이진화 하였다. 즉, 네 가지 방법에 대하여 각각 128부터 255까지의 128개의 이진 영상들이 만들어졌다. Marcu의 방법<sup>[17]</sup>을 적용할 때는 [17]에 정의된 상위 9라인의 검색 영역 및 순서에 준하여 이진화를 수행하였다. 모든 영상(128개의 영상 4가지 방법 = 512개의 영상)에 대하여 아래의 식 (11)에 정의된  $D_x$ 를 계산하였다.  $D_x$ 는 이진 영상내에 존재하는 모든 소수화소들간의 최소거리와 주거리의 차이의 제곱을 평균한 것으로서 이진 영상에서 소수화소들간의 거리가 주거리와 얼마나 일치하는지를 나타내는 척도이다.

$$D_x = \frac{1}{N_x} \sum_{k=1}^{N_x} (d_{min}^B(k) - \lambda_x)^2 \quad (11)$$

여기서  $N_x$ 는  $x$ 라는 단일 계조를 나타내는 이진영상에서의 소수 화소들의 개수를 나타낸다.  $d_{min}^B(k)$ 는 이진 영상 내의  $k$ 번째 소수화소에 대한 최소화소거리를 나타낸다. 즉, 주어진 소수화소와 가장 가까운 소수화소간의 거리를 의미한다. 이상적으로 소수화소들간의 최소 거리는 주거리를 만족하여야 한다. 따라서, 식 (11)에서는  $d_{min}^B(k)$ 와 주거리  $x$ 의 차이를 제곱하여 평균하였다. 식 (11)의  $D_x$ 를 128과 255사이의 계조 각각에 대하여 계산하였으며 이 과정을 4가지 방법에 대해 동일하게 수행하였다.

그림 5는 4가지 방법에 대한 계조별  $D_x$ 값을 나타낸다. 참고로 0부터 127까지의  $D_x$ 값은 128에 대하여 대칭이다. 도트의 균일한 분포 정도는 밝은 계조(highlight)나 어두운 계조(shadow)에서 인간 시각에 민감하게 인식된다. 그림 5에서 보듯이 기존의 세 가지

방법들<sup>[15,17,20]</sup>은 밝은 계조에서 제안하는 방법에 비해 상대적으로 큰  $D_x$ 값을 나타내는 것을 알 수 있다.  $D_x$ 가 큰 값을 나타낸다는 것은 이진 영상에서 소수화소들의 공백(void)이나 밀집(cluster)영역이 존재함을 의미한다.

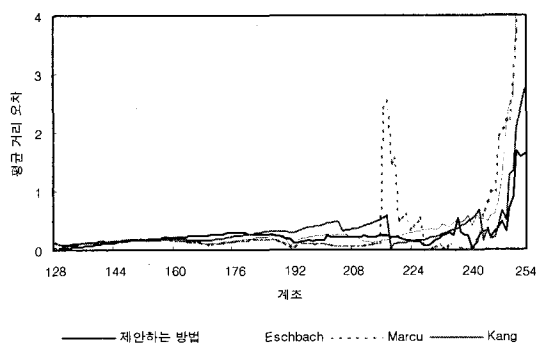


그림 5. 네 가지 방법에 대한 계조별  $D_x$ 값  
Fig. 5.  $D_x$  vs Gray Levels for Four Different Methods.

표 2는 그림 5에서 계조별로 계산된 결과를 평균한 값들을 나타낸다. 표 2에서 보듯이 제안하는 방법에서 소수화소들간의 거리가 주거리를 가장 잘 나타냄을 확인할 수 있다.

표 2. 네 가지 방법에 대한 계조별  $D_x$ 값의 평균

Table 2. Average of  $D_x$  for Four Different Methods.

방법	Eschbach <sup>[15]</sup>	Kang <sup>[20]</sup>	Marcu <sup>[17]</sup>	제안하는 방법
$E[D_x]$	0.5940	0.3347	0.7476	0.2439

다음에는 이진화 방법의 중요한 성능 지표들 중의 하나인 계조 재현성을 평가하였다. 단일 계조 이진 영상에서 소수화소들의 이상적인 개수는 영상의 크기가 주어지면 주어진 계조값에 의해 계산된다. 예를 들어 영상의 크기가  $256 \times 256$ 인 경우 계조값  $x$ , ( $128 \leq x \leq 255$ )에 대해 소수화소의 이상적인 개수  $N_{x, ideal}$ 는 아래의 식 (12)와 같다.

$$N_{x, ideal} = (256 \times 256) \frac{(255 - x)}{255} \quad (12)$$

따라서, 이상적인 소수화소의 개수와 실제 소수화소의

개수를 계조 재현성의 척도로서 정의한다. 이는 다음의 식 (13)과 같이 계산된다.

$$I_x = |N_x - N_{x, ideal}| \quad (13)$$

여기서  $N_x$ 는 식 (11)에서와 마찬가지로  $x$ 라는 단일 계조를 나타내는 이진영상에서의 소수화소들의 실제 개수를 나타낸다. 식 (13)의  $I_x$ 를 도트 분포의 균일성을 평가하기 위해 사용된 모든 이진 영상에 대하여 계산하였다. 표 3은 네 가지 이진화 방법 각각에 대하여 계조별로 계산된  $I_x$ 를 평균한 결과이다. 표 3에서 보듯이 제안하는 방법이 가장 정확하게 계조를 재현함을 확인할 수 있다. 비교를 위해 사용된 [17]의 방법에서는 이미 설명하였듯이 메모리를 줄이기 위해 [17]에 제안된 9라인 메모리의 검색 영역과 순서를 사용하였다. 따라서, 계조가 정확히 표현되지 않음을 확인할 수 있다.

표 3. 계조 128에서 254에 대한  $I_x$ 의 평균  
Table 3. Average of  $I_x$  Values Calculated for Gray levels 128 to 254.

방법	Eschbach <sup>[15]</sup>	Kang <sup>[20]</sup>	Marcu <sup>[17]</sup>	제안하는 방법
$E[I_x]$	110.920	33.706	181.079	26.761

그림 6은 밝은 계조에서의 도트 분포를 평가하기 위해 계조 250의 256256 단일 계조 영상에 대해 기존의 3가지 방법들과 제안하는 방법을 적용한 결과이다. [15]와 [20]에서 제안된 방법은 그림 6(a)와 6(b)에서 확인할 수 있듯이 이진 영상의 윗 부분에 공백 영역(void)을 발생시킨다. 이러한 현상이 발생하는 이유는 [15]와 [20]의 방법이 소수화소의 위치를 정확히 고려하여 이진 문턱값을 조절하지 않기 때문이다. [17]의 방법의 결과인 그림 6(c)에서는 소수화소가 일정한 규칙을 가지고 분포하고 있다. 이러한 규칙적인 패턴이 나타나는 것은 [17]의 방법이 소수화소들의 상대적인 위치를 미리 정하여 이진화 하기 때문이다. 반면에 그림 6(d)에서 보듯이 제안하는 방법은 특정 패턴이 없이 균일하게 분포하고 있음을 확인할 수 있다.

그림 7은 기존의 방법들과 제안하는 방법을  $410 \times 500$  크기의 일반 영상에 대해 적용한 결과이다. 그림 7(a)에서는 양파의 밝은 부분과 양파 뒤의 도마 부분에서 소수화소가 균일하지 못한 분포를 나타내고 있으며 그

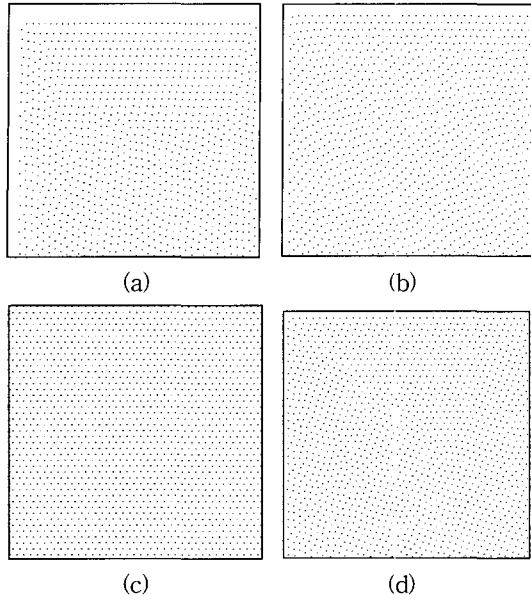


그림 6. 단일 계조 250에 대한 실험 결과  
 (a) Eschbach 방법<sup>[15]</sup> (b) Kang 방법<sup>[20]</sup>  
 (c) Marcu 방법<sup>[17]</sup> (d) 제안하는 방법  
 Fig. 6. Experimental Results with Constant Level 250.

- (a) Eschbach's Algorithm<sup>[15]</sup>
- (b) Kang's Algorithm<sup>[20]</sup>
- (c) Marcu's Algorithm<sup>[17]</sup>
- (d) Proposed Algorithm

그림 7(b)는 도마 뒤의 절구공이와 검은 배경의 위쪽 경계면에서 소수화소가 일정 방향으로 정렬되고 있음을 알 수 있다. [17]의 방법에 대한 결과인 그림 7(c)는 [15]와 [20]의 방법에 비해 소수화소들이 균일하게 분포하고 있다. 하지만 소수화소의 유무를 검사하기 위한 검색 영역의 감소로 인해 배경 부근에 다른 3가지 방법 보다 많은 수의 흰점들을 나타나고 있다. 이러한 현상은 표 3을 통해 고찰한 바와 같이 [17]의 방법이 원영상의 계조를 정확히 표현하지 못하기 때문이다. 상대적으로 제안하는 방법에 의해 얻어진 그림 7(d)가 우수한 화질을 나타냄을 확인할 수 있다.

마지막으로 기존의 방법들과 제안하는 방법을 적용함에 있어 요구되는 계산량과 메모리 사용량을 표 4에서 비교하였다. [15]의 방법은 threshold imprint를 전파하는 과정으로 인해 계산량이 크게 증가하게 되며 [20]의 방법은 현재 이진화 하는 화소의 계조값에 의해서 이진 문턱값을 변화시키기 때문에 [15]의 방법에 비해 적은 계산량과 메모리량을 사용한다. 제안하는 방법은

MPOA 기법을 사용하여 이진 화소들의 위치를 저장하기 때문에 [17]의 방법에 비해 메모리량이 크게 감소한다. 또한 제안하는 방법은 거리계산을 lookup table을 이용하여 계산하기 때문에 계산량의 증가는 거의 없다.

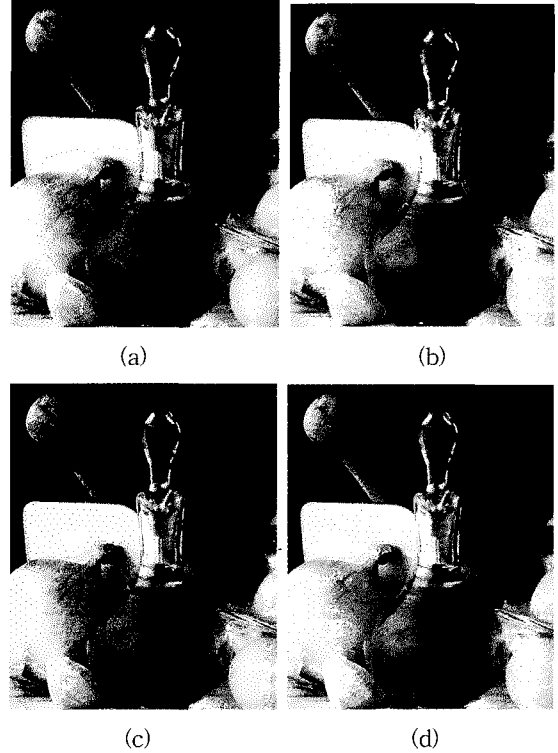


그림 7. 일반 영상에 대한 실험 결과  
 (a) Eschbach 방법<sup>[15]</sup> (b) Kang 방법<sup>[20]</sup>  
 (c) Marcu 방법<sup>[17]</sup> (d) 제안하는 방법  
 Fig. 7. Experimental Results with a Natural Image  
 (a) Eschbach's Algorithm<sup>[15]</sup>  
 (b) Kang's Algorithm<sup>[20]</sup>  
 (c) Marcu's Algorithm<sup>[17]</sup>  
 (d) Proposed Algorithm

표 4. 계산량과 메모리량  
 Table 4. Computational Complexity and Memory Resources.

	+, -	×, /	<, >	line memory
Eschbach <sup>[15]</sup>	21	13	2	2
Kang <sup>[20]</sup>	7	8	1	1
Marcu <sup>[17]</sup>	4	4	148	10
제안하는 방법	4	4	33	2



## V. 결 론

본 논문에서는 균일한 도트 분포를 실현하기 위하여 주거리 기반의 오차확산 방법을 제안하였다. 제안하는 방법에서는 주거리를 기반으로 하는 새로운 변수  $v_x(m, n)$ 를 정의하여 오차확산 방법에 적용하였다. 제안하는 오차확산 방법에서는 소수화소들간의 최소거리가 평균적으로 이상적인 주거리와 일치하도록 최소화 거리를 이진문턱값으로 사용하여 이진화를 수행하였다. 또한, 본 논문에서는 최소화거리를 효과적으로 계산하기 위한 방법으로 MPOA기법을 제안하였다. MPOA기법은 이미 이진화 된 화소들의 종류와 2차원 상의 위치를 1차원으로 변환하여 저장함으로써 적은 계산량과 메모리량으로 최소화소거리를 계산하는 방법이다. 실험 결과를 통해 제안하는 방법이 기존에 균일한 도트 분포를 위해 제안된 방법들에 비해 향상된 도트 분포를 생성하며 또한, 주어진 계조를 정확하게 재현함을 확인할 수 있었다.

## 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 gray-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*, pp. 30-34, SPIE, 1999.
- [6] S. Kollias and D. Anastassiou, "A unified neural network approach to digital image halftoning," *IEEE Trans. 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 bluenoise mask," *Proc. of IEEE Int. Conf. On Comm.* 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.
- [17] G. Marcu, "An error diffusion algorithm with output position constraints for homogeneous highlight and shadow dot distribution," *SPIE* Vol. 3300, pp. 314-352, 1998.
- [18] R. Levien, "Output dependent feedback in error

- diffusion halftoning," *IS&T 46th Annual Conf.*, pp. 115-118, 1993.
- [19] K. M. Kang and C. W. Kim, "A principal distance constraint error diffusion algorithm for the homogeneous dot distribution," *SPIE Vol. 3963*, pp. 510-520, 2000.
- [20] 강 기민, 김 춘우, "균일한 도트 분포를 위한 문턱값 변조 오차확산 방법," *전자공학회논문지*, 제 37권 SP편 4호 pp. 279-288, 2000.

---

 저 자 소 개
 

---

## 姜 奇 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 椿 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