

인간 시각 특성을 고려한 오차 확산 커널의 동적 결정 방법

강승우 · 강기민* · 김춘우*

LG전자 미디어 통신 연구소, *인하대학교 전기공학과 영상시스템연구실

A Dynamic Estimation for Error Diffusion Kernel Based on Human Visual System

Seung-Woo Kang, Ki-Min Kang* and Choon-Woo Kim*

Media Communication Research Lab., LG Electronics

*Department of Electrical Engineering, Inha University

초 록. 연속 계조 영상을 이진 영상으로 변환하는 기법을 하프토닝이라고 한다. 다양한 하프토닝 방법들 중에서 가장 널리 사용되는 방법으로 오차 확산 방법이 있다. 오차 확산 방법에 의해 이진화된 영상의 화질은 오차 확산 계수, 오차가 전파될 주위 화소들의 위치 및 이진화 방법 등에 의해 좌우된다. 본 논문에서는 주어진 입력 영상의 내용에 따라 오차 확산 계수를 동적으로 계산하여 이진화하는 방법을 제안한다. 오차 확산 계수는 입력 연속 계조 영상과 출력 이진 영상간의 오차 기준을 정의하고 이를 최소화함으로써 계산된다. 최소화를 위한 오차 기준에 인간의 영상 인식 특성을 고려한다. 제안된 방법의 결과를 기존의 오차 확산 방법에 의한 결과와 비교 분석한다.

ABSTRACT. Conversion of the gray level image into the binary equivalent is called as digital halftoning. Error diffusion has been one of the most popular digital halftoning techniques. The quality of binary image obtained by the error diffusion technique is majorly determined by the error diffusion kernel, locations of neighbors for the error propagation, and quantization process. This paper presents an error diffusion method to dynamically calculate the kernel for error propagation based on the input gray level image. The error diffusion kernel is determined by minimizing the predefined error criterion between the input gray level and output binary image. The characteristics of human visual system is incorporated into the error criterion for minimization. The results obtained based on the proposed techniques are analyzed and compared with those by the existing error diffusion techniques.

1. 서 론

최근 수년간 컴퓨터 하드웨어의 보급과 응용 소프트웨어의 활용 범위가 넓어짐에 따라 영상 출력 장치에 대한 요구가 증가하고 있다. 예를 들어, 지난 4년간 영상 출력 장치의 하나인 잉크젯 프린터의 연간 국내 시장 성장률은 150% 정도에 달한다.¹ 이제는 임팩트 방식의 도트 매트릭스 프린터는 찾아보기 힘들며 가정이나 사무실에서 잉크젯이나 레이저 방식의 프린터들을 쉽게 발견할 수 있다. 앞으로도 소비자의 저가, 다기능, 고화질 출력 장치에 대한 요구가 계속되리라 예상된다.

대표적인 디지털 영상 출력 장치들로는 (1) 잉크젯,

레이저, LED, 열전사, 열승화 등 다양한 방식의 프린터, (2) 복사기, 스캐너 및 프린터의 기능을 모두 갖는 디지털 복합기, (3) 팩스, (4) 디지털 복사기 등을 들 수 있다. 이들 대부분의 디지털 영상 출력 장치는 일정한 크기의 점들을 종이 평면의 격자 위에 인쇄하거나 인쇄되지 않은 채로 남겨 둬으로써 주어진 영상을 표현한다. 예를 들어, 흑백 인쇄의 경우, 주어진 해상도에 따라 결정되는 종이 평면상의 격자 상에 일정한 크기의 검은 점들의 인쇄 위치를 조절함으로써 흰색과 검정색사이의 다양한 회색을 표현하게 된다. 주어진 면적에 인쇄된 검정색 점들의 조합은 일정 거리에서 보면 인쇄된 각각의 검정색 점들로서 인지되지 못하고 인쇄된 점들의 개수나 크기에 따라 평균값으로서의 회

색으로 인지하게 된다. 이것은 인간의 시각 분해능의 한계 때문에 생기는 착각이다. 따라서, 연속 계조 영상을 이와 같은 이진 영상 출력 장치를 통해 인쇄하기 위해서는 먼저 입력 연속 계조 영상을 이진 영상으로 변환시켜야 한다. 이와 같은 이진화 기법을 흔히 하프토닝 방법이라 한다.

이상적인 하프토닝 방법은 입력 연속 계조 영상을 이진화하여 출력하였을 때 인간의 정상 시각 인식 능력으로는 연속 계조 영상과 출력 이진 영상간의 차이를 인식하지 못하도록 하여야 한다. 현재까지 발표되어 사용되는 다양한 영상 하프토닝 방법들은 크게 디더링^{2,5}이나 오차 확산 방법^{6,12}으로 분류할 수 있다. 디더링은 이진화되어야 할 화소의 계조값을 미리 정해진 문턱값 배열과 비교하여 이진화하는 방법이다. 이 방법은 오차 확산 방법에 비교하여 구현 속도는 빠르나 특히 낮은 해상도에서 좋지 않은 화질을 나타낸다.

오차 확산 방법은 1975년에 Floyd와 Steinberg의 의해 제안되었다.⁶ 오차 확산 방법이란 주어진 화소에서 이진화에 따른 오차를 미리 정의된 오차 확산 계수값들에 의해 앞으로 이진화 될 주위 화소들에 일정 비율씩 확산시켜 그들이 이진화 될 때 고려되도록 하는 방법이다. 디더링에 비해 개선된 화질을 얻을 수 있는 방법으로서 종전에는 고화질을 요구하는 고가의 출력 장치에 주로 사용되어 왔으나 최근에는 계산 용량의 증가 추세에 따라 저가의 출력 장치에서도 소프트웨어나 하드웨어로 구현되어 널리 사용되고 있다. 그러나, 오차 확산 방법은 특정 계조에서 눈에 거슬리는 패턴이 발생하고 경계선이 선명하지 못한 단점이 있다. 오차 확산 방법에 의해 얻어진 이진 영상의 화질은 오차 확산 계수의 값, 오차가 전파될 주위 화소들의 위치 및 이진화 방법 등에 의해 좌우된다. 화질 개선을 위하여 이들 세 가지 요소들을 변형한 다양한 방법들이 제안되었다.^{7,12} 이러한 시도들의 하나로서 입력 연속 계조 영상의 내용에 따라 오차 확산 계수를 동적으로 결정하는 방법이 제안된 바 있다.⁸ 제안된 방법에서는 먼저 입력 연속 계조 영상과 출력 이진 영상간의 오차 기준을 정의하였다. 사용된 오차 기준의 목적은 낮은 공간 주파수 영역에서 입력 연속 계조 영상과 출력 이진 영상간의 차이를 최소화하는데 있다. 최소화를 수행하게 되는 주파수의 영역은 연속 계조 값에 따라서 결정하였다. [8]에서 제안된 방법에 의해 이진화된 영상에서는 Floyd와 Steinberg의 방법에 의한 결과와 비교하여

눈에 거슬리는 원하지 않는 패턴(artifacts)이 어느 정도 감소되는 효과를 얻을 수 있었다.

본 논문에서는 [8]에서 제안된 방법을 개선하여 원하지 않는 패턴을 더욱 감소시키기 위한 방법을 제안한다. 제안하는 방법에서는 최소화를 위한 오차 기준에 연속 계조값에 의해 결정되는 저역 필터 뿐만 아니라 인간의 영상 인식 특성을 고려한 저역 필터를 추가로 고려하였다. 또한, 최소화 과정에서 사용되는 주위 화소들의 위치를 3×3 영역으로 확장하였다.

2절에서는 먼저 Floyd와 Steinberg의 오차 확산 방법과 [8]에서 제안된 동적 하프토닝 방법을 요약한다. 3절에서는 본 논문에서 제안하는 오차 확산 방법에 대하여 자세히 설명한다. 4절에서는 본 논문에서 제안하는 방법에 의하여 이진화 결과를 얻은 실험 내용을 제시하고 기존의 방법들의 결과와 비교 분석한다.

2. 기존의 오차 확산 방법

기존에 제안된 오차 확산 방법들 중에서 본 논문에서 제안하는 방법과 밀접한 관련이 있는 Floyd와 Steinberg의 오차 확산 방법과 [8]에서 제안된 동적 하프토닝 방법을 먼저 설명하기로 한다.

2.1. Floyd-Steinberg 오차 확산 방법⁶

먼저, $x(m, n)$ 은 이진화의 대상인 입력 연속 계조 영상의 (m, n) 번째 화소로서 8비트의 계조값 즉, $\{0, 1, 2, \dots, 255\}$ 중의 하나의 값을 갖는다고 가정한다. 또한, $b(m, n)$ 은 0이나 255의 값을 갖는 출력 이진 영상을 나타낸다. 대표적인 오차확산 방법인 Floyd-Steinberg의 방법⁶은 다음과 같은 수식으로 나타내어진다.

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

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

$$b(m, n) = \begin{cases} 255 & \text{if } u(m, n) \geq 127 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

식 (1)에서 $e(m, n)$ 은 (m, n) 번째 화소에서의 출력 이진 값과 이미 이진화된 화소들에서 발생된 오차에 의해 누적 수정된 화소값 $u(m, n)$ 간의 차이를 나타낸다. 식 (2)는 누적 수정된 화소값 $u(m, n)$ 의 계산을 나타낸다. 식 (2)에서 R 은 오차가 전파될 주위 화소들의 집합이며 $w(k, l)$ 은 R 의 (k, l) 번째 화소에 전파되는 오차의 정

도를 나타내는 오차 확산 계수이다. 식 (3)은 이진 영상 $b(m, n)$ 이 $u(m, n)$ 의 값과 문턱값인 127을 비교하여 결정됨을 나타낸다. Floyd와 Steinberg의 오차 확산 커널, 즉 R의 위치와 오차 확산 계수값 $w(k, l)$ 은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} w(0, 0) & w(0, 1) & w(0, 2) \\ w(1, 0) & * & \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/16 & 5/16 & 3/16 \\ 7/16 & * & \end{bmatrix} \quad (4)$$

Floyd와 Steinberg의 오차 확산 방법에서의 주위 화소들의 위치와 오차 확산 계수들은 경험적인 방법에 의하여 결정되었다. 이와 같은 Floyd와 Steinberg의 오차 확산 방법을 적용하여 얻어진 이진 영상의 몇몇 특정 계조에서는 원하지 않는 패턴이 나타나게 된다.

일반적으로 오차 확산 방법에 의해 이진화된 영상의 화질은 R의 범위, 즉 오차가 전파될 주위 화소들의 위치, $w(k, l)$ 의 값 및 식 (3)에서의 127과 같은 문턱값의 결정 방법등에 의해 좌우된다. 오차 확산 방법에 의해 이진화된 영상의 화질을 보완하기 위한 시도로서 Blue Noise를 이용한 방법,⁵ 오차 확산 계수를 불규칙하게 변화시켜 주는 방법⁴ 등이 제안되었다. 이러한 시도들의 하나로서 이진화하려는 화소의 주파수 특성을 고려하여 적응적으로 오차 확산 계수를 계산하는 방법⁸이 발표된 바 있다. 다음에는 [8]에서 제안된 오차 확산 방법을 요약한다.

2.2. Wong의 적응적 오차 확산 방법⁸

오차 확산 방법에 의해 이진화된 영상에 나타나는 원하지 않는 패턴들을 감소시키기 위하여 [8]에서는 적응적 오차 확산 방법을 제안하였다. Floyd와 Steinberg의 오차 확산 방법에서는 식 (4)와 같이 정의된 오차 확산 커널이 영상의 내용에 관계없이 모든 화소에 대하여 적용되는 반면에 [8]에서 제안한 방법에서는 주어진 화소가 이진화된 후 주위 화소들에 전파될 오차의 정도를 나타내는 오차 확산 계수값 $w(k, l)$ 을 주어진 화소의 계조값에 따라 적응적으로 계산하였다. [8]에서는 오차 확산 계수값의 계산을 위하여 다음과 같은 가중 오차 기준(weighted error criterion)을 정의하였다.

$$Q_1(m, n) = E\{v_x(m, n) * (b(m, n) - x(m, n))\}^2 \quad (5)$$

여기서 *은 컨볼루션을 의미한다. 식 (5)의 우변에 있는 가중 필터 $v_x(m, n)$ 은 $x(m, n)$ 의 값에 따라서 특별히 정의된 저역 필터 $V_x(u, v)$ 의 역푸리에 변환을 나타낸다.

입력 화소 $x(m, n)$ 에 대한 저역 필터 $V_x(u, v)$ 는 다음과 같이 계산된다. 먼저 $x(m, n)$ 의 화소값만을 갖는 단일 계조 영상을 만든다. 만들어진 단일 계조 영상을 Floyd와 Steinberg의 오차 확산 방법에 의해 이진화한다. 이진화된 단일 계조 영상에서 원형 파워 스펙트럼(radial power spectrum)을 계산한다. 계산된 파워 스펙트럼으로부터 문턱 주파수이상의 주파수에 해당하는 에너지가 전체 에너지의 99%가 되도록 문턱 주파수를 결정한다. 여기서, 99%라는 숫자는 좋은 이진화 결과를 얻기 위하여 실험적으로 결정된 값이다. 이와 같이 계산한 문턱 주파수를 갖는 필터 $V_x(u, v)$ 가 주어진 화소 $x(m, n)$ 에 대하여 정의된 저역 필터로서 사용된다. 문턱 주파수까지의 이득(gain)은 상수 1이다. $V_x(u, v)$ 는 주어진 화소의 계조값에 의해 정의되므로 미리 256계조에 대하여 256가지의 문턱 주파수를 계산하여야 한다. 0에서 255 사이의 모든 계조값에 대하여 위와 같이 계산된 문턱 주파수는 각 계조에 대해 정의된 principal 주파수보다는 낮은 값을 갖는다. 각 계조값에 대하여 계산된 저역 필터를 Floyd와 Steinberg의 오차 확산 커널의 위치에서 값을 갖도록 역푸리에 변환을 이용하여 근사함으로써 $v_x(m, n)$ 을 계산한다.

식 (5)의 가중 오차 기준 $Q_1(m, n)$ 을 최소화한다는 것은 낮은 주파수 영역에서 입력 영상과 출력 영상간의 차이를 최소화함을 의미한다. [8]에서 제안된 방법에서는 주어진 화소에 대하여 식 (5)의 가중 오차 기준을 반복적 계산을 통해 최소화함으로써 새로운 오차 확산 계수값을 결정하게 된다. [8]에서는 식 (4)에서 정의된 주위 화소 위치를 사용하여 반복 계산을 수행하였고 따라서 $v_x(m, n)$ 의 값도 오차 확산 계수와 같은 위치에서 값을 갖도록 역푸리에 변환되었다. 자세한 계산 과정은 [8]에 설명되어 있다. 제안된 방법에 의해 이진화된 영상은 Floyd와 Steinberg의 오차 확산 방법에 의해 이진화된 영상과 비교하여 다소 감소된 잡음을 나타낸다. 다음에는 본 논문에서 제안하는 방법을 설명하기로 한다.

3. 제안하는 동적 오차 확산 방법

본 논문에서는 이진 영상에서 나타나는 원하지 않는 잡음을 더욱 감소시키기 위하여 [8]에서의 방법을 개선한 동적 오차 확산 계수 계산방법을 제안한다. 제안하는 방법과 [8]에서의 방법과의 차이는 다음 두 가지로

설명할 수 있다. 첫째, 사람의 시각 체계의 특성을 나타내는 전달 함수(photopic modulation transfer function)¹³를 가중 오차 기준에 적용하는 것이다. 이와 같은 전달 함수는 각 주파수에 대한 인간 시각의 인식 정도를 나타내는 저역 필터로 표현된다. 본 논문에서 오차 확산 계수의 계산을 위하여 사용한 가중 오차 기준은 다음과 같다.

$$Q_2(m, n) = E\{[v_x(m, n) * h(m, n) * (b(m, n) - x(m, n))]^2\} \quad (6)$$

여기서 $h(m, n)$ 은 인간 시각 전달 함수 $H(u, v)$ 의 역푸리에 변환을 나타낸다. 실험에 의하여 얻어진 인간 시각 전달함수는 다음과 같이 표현되어진다.

$$H(f_x) = \begin{cases} 2.2(0.19 + 0.114 f_x) \exp(-(0.114 f_x)^{1.1}), & \text{if } f_x > f_{\max} \\ 1.0, & \text{if } f_x \leq f_{\max} \end{cases} \quad (7)$$

여기서 f_x 는 원형 주파수(radial frequency)이며 f_{\max} 는 $H(f_x)$ 의 값이 최대값을 갖는 주파수를 나타낸다. 식 (7)의 변수를 공간 주파수 평면에서의 수직, 수평 주파수로 변환하면 저역 통과 필터인 $H(u, v)$ 를 얻게 된다. 식 (5)에서는 $V_x(u, v)$ 만이 가중 필터로 사용되는데 반하여 본 논문에서는 식 (6)에서와 같이 $H(u, v) V_x(u, v)$ 를 주파수 영역에서의 가중 필터로 사용한다. $H(u, v)$ 를 추가함으로써 통과대역(passband)을 인간 시각 특성의 한계로 제한하고 또한 통과대역에서의 이득(gain)이 상수 1이 아니라 주파수별로 식 (7)에서 정의된 인간의 시각 특성을 반영하게 된다.

식 (1)과 (2)를 이용하면 식 (6)은 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$Q_2(m, n) = E\{[a(m, n) * (\delta(m, n) - w(m, n))]^2\} \quad (8)$$

여기서 $a(m, n) = h(m, n) * v_x(m, n) * e(m, n)$ 이며, $\delta(m, n)$ 은 이차원 델타 함수를 의미한다.

둘째, [8]에서 제안된 적응 오차 확산 방법에서는 저역 통과 필터인 $V_x(u, v)$ 로부터 $v_x(m, n)$ 을 계산하기 위하여 역푸리에 변환을 수행할 때 식 (4)에 나타난 Floyd와 Steinberg 방식에서 정의된 주위 화소들의 위치에 대해서만 $v_x(m, n)$ 을 근사적으로 계산하였다. 이는 주어진 연속 계조 영상을 스캐닝 순서에 따라 적응적으로 이진화할 때 이미 이진화한 화소들과 현재 이진화하려는 화소에서만 $e(m, n)$ 값이 존재하기 때문이다. 인간이 영상을 인지할 때 각각의 화소를 인식하기

보다는 일정한 면적내의 화소들을 통해 인지한다는 사실을 고려하여 본 논문에서는 $h(m, n)$ 과 $v_x(m, n)$ 을 3×3 의 윈도우를 갖도록 계산하였다. 또, $e(m, n)$ 을 계산할 때, 아직 오차가 전파되지 않은 3×3 영역내의 화소들에 대하여는 127을 문턱값으로 가상 이진화하여 생긴 오차를 그 화소에서의 $e(m, n)$ 값으로 근사하여 사용하였다. 3×3 영역에서의 계산을 제안하는 이유는 다음과 같다. 눈에 거슬리는 패턴은 양자화 방법을 고정하였을 때 오차가 확산되는 주위 화소들의 위치에 따라 많은 영향을 받는다. 주위 화소들의 위치를 causal한 영역에서 결정하였을 경우 주파수 특성이 isotropic하지 않은 경우가 대부분이므로 본 논문에서는 주위 화소들의 위치를 non-causal한 3×3 영역으로 확장하였다. 이와 같은 두 가지 특징을 포함하여 $Q_2(m, n)$ 을 최소화하는 오차 확산 계수를 동적으로 계산함으로써 이진화를 수행한다. 본 논문에서 제안하는 오차 확산 계수들에 대한 계산방법은 다음과 같이 요약된다.

3.1. 본 논문에서 제안하는 오차 확산 알고리즘

과정 1

반복 계산에서의 초기값인 $w_i(k, l)$ 으로서 식 (4)에 나타낸 Floyd와 Steinberg 방식의 오차 확산 계수를 사용한다.

과정 2

본 알고리즘을 i 번째, $i = 1, 2, 3, \dots$ 수행할 때

$$a(m, n) = h(m, n) * v_x(m, n) * e(m, n) \quad (9)$$

을 계산한다. 여기서, $h(m, n)$ 은 공간 영역에서 3×3 의 사이즈를 갖도록 $H(u, v)$ 를 역푸리에 변환하여 계산한다. $v_x(m, n)$ 도 마찬가지로 3×3 사이즈이며 $V_x(u, v)$ 의 역푸리에 변환이다. $e(m, n)$ 은 이미 이진화된 화소나 현재 이진화할 화소에 대하여는 식 (1)을 이용하여 계산하고 나머지 3×3 영역내의 화소들에 대한 $e(m, n)$ 은 다음과 같이 계산한다. 먼저 이진화가 수행되지 않은 3×3 영역내의 비인과적 화소들을 문턱값 127을 이용하여 이진화한다. 이때 이진화된 값과 $x(m, n)$ 의 차이를 $e(m, n)$ 으로 사용한다.

과정 3

위의 과정 2에서 계산한 $a(m, n)$ 을 이용하여 다음의 $q(m, n)$ 을 계산한다. $q(m, n) = [a(m, n) - a(m - \tilde{k}, n - \tilde{l})]$

$$- \sum_{(k, l) \in R_1 - (\tilde{k}, \tilde{l})} w_i(k, l) [a(m - k, n - l) - a(m - \tilde{k}, n - \tilde{l})] \quad (10)$$

여기서 R_1 은 이진화하려는 화소를 중심으로하여 결정되는 3×3 의 주위 화소들의 집합을 의미하며 (\tilde{k}, \tilde{l}) 은 R_1 에서 임의로 선택한 주위 화소의 위치이다.

과정 4

다음의 식 (11)과 (12)를 이용하여 오차확산 계수의 값을 변화시킨다.

$$w_{i+1}(k, l) = w_i(k, l) - \mu \frac{\partial g(m, n)}{\partial w_i(k, l)}, (k, l) \in R_1 - (\tilde{k}, \tilde{l}) \quad (11)$$

$$w_{i+1}(\tilde{k}, \tilde{l}) = 1 - \sum_{(k, l) \in R_1 - (\tilde{k}, \tilde{l})} w_{i+1}(k, l) \quad (12)$$

여기서 μ 는 주어진 상수이다.

과정 5

과정 4에서 계산된 $w_{i+1}(k, l)$ 과 $w_i(k, l)$ 의 제곱의 차이가 미리 정의된 문턱값보다 크면 $i=i+1$ 되어 과정 2로 가게 된다. 반대로 문턱값보다 작으면 주어진 과정 4에서 계산된 오차확산 계수에 의해 이진화를 수행하고 주어진 연속 계조 영상에서의 다음 화소에 대하여 과정 1을 수행한다.

다음 절에서는 제안한 알고리즘을 실제 연속 계조 영상에 적용한 실험 방법을 설명하고 그 결과를 Floyd와 Steinberg 방식과 [8]에서의 적응 오차 확산 방법을 사용했을 때의 결과와 비교 분석한다.

4. 실험 및 결과

4.1. 실험 1. 연속 계조 램프 영상을 이용한 실험

본 실험에서는 화소들의 값이 0부터 255까지 순차적으로 증가하는 100×512 사이즈의 연속 계조 램프 영상을 입력영상으로 사용하였다. 연속 계조 램프 영상을 다음과 같은 4가지 방법들에 의하여 이진화 하였다. (1) Floyd와 Steinberg 방식; 즉, 입력 램프 영상에 식 (4)에 정의된 오차 확산 커널을 이용하여 식 (1-3)을 적용하였다. (2) [8]에서 제안된 적응 오차 확산 방식 (3) [8]의 방법에 $h(m, n)$ 만을 추가시킨 방식; 이 실험은 인간 시각 특성 필터의 효과를 확인하기 위하여 수행하였다. 이때, $h(m, n)$ 과 $v_x(m, n)$ 은 [8]에서와 같이 Floyd와 Steinberg 방식의 오차 확산 커널에 대하여 근사하여 계산하였다. (4) 본 논문에서 제안하는 방법이다. 본 논문에서 제안하는 알고리즘을 적용하기 위하여 먼저 $H(u, v)$ 와 $V_x(u, v)$ 를 주파수 영역에서

64×64 의 배열로 샘플링 하였다. 샘플링된 $H(u, v)$ 와 $V_x(u, v)$ 를 역푸리에 변환하여 공간 영역에서 3×3 의 사이즈를 갖는 $h(m, n)$ 과 $v_x(m, n)$ 을 근사하여 계산하였다. 역변환시 발생하는 오차를 최소화하기 위하여 주파수 영역에서 최소제곱법¹⁴⁾을 사용하였다. 식 (11)에서 사용되는 상수 μ 의 값은 3×10^{-6} 이었다. 또한, 주어진 화소에 대하여 오차 확산 계수를 계산할 때 최고 15번까지만 반복되도록 과정 5에서의 문턱값을 결정하였다.

이와 같이 4가지 방법에 의해 연속 계조 램프 영상을 이진화한 결과를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1의 (a)는 Floyd와 Steinberg 방식, (b)는 [8]에서 제안된 적응 오차 확산 방식, (c)는 [8]의 방법에 $h(m, n)$ 만을 추가시킨 방식, (d)는 본 논문에서 제안하는 방법에 의한 결과를 나타낸다. Floyd와 Steinberg 방식에 의한 결과인 Fig. 1(a)에서는 계조 65, 86, 128, 171, 192 등의 근처에서 눈에 거슬리는 패턴들이 많이 발생됨을 알 수 있다. [8]에서 제안된 방법의 결과인 Fig. 1(b)에서는 계조 128 근처의 패턴들이 어느 정도 감소한 것을 알 수 있다. 하지만, Fig. 1(a)의 다른 계조들에서 나타났던 패턴들은 Fig. 1(b)에서도 여전히 나타난다. [8]에서 제안된 방법에 $h(m, n)$ 만을 추가시킨 실험의 결과인 Fig. 1(c)에서는 계조 128 근처의 패턴이 현저히 감소된 것을

Fig. 1. Experimental results with gray level ramp image.

Fig. 2. Experimental results with constant gray image of level 128. (a) Floyd-Steinberg's Algorithm, (b) Wong's Algorithm, (c) Proposed Algorithm.

알 수 있다. Fig. 1(b)와 1(c)를 비교할 때 인간의 시각 인식 특성을 가중 오차 기준에 적용함으로써 더욱 개선된 화질을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 마지막으로 본 논문에서 제안한 방법의 결과인 Fig. 1(d)에서는 계조 128 근처의 패턴들이 거의 없어졌으며 다른 계조들에서 나타나던 패턴들도 훨씬 감소하였음을 볼 수 있다. 이는 [8]에서 사용된 인과적(causal)인 주위 화소들의 위치들과는 달리 제안하는 방법에서는 3×3 영역의 모든 화소들을 주위 화소들로 사용함으로써 얻어진 결과이다. Fig. 1의 (a-d)와 같이 4 가지 서로 다른 오차 확산 방법들을 연속 계조 램프 영상에 적용한 결과 본 논문에서 제안하는 알고리즘의 경우 원하지 않는 패턴이 가장 적게 나타남을 알 수 있다.

또한, 본 논문에서 제안하는 알고리즘이 원하지 않는 패턴을 감소시키는 효과를 자세히 보기 위하여 계조 128만을 갖는 100×100 의 단일 계조 영상을 만들었다. 이 영상에 Floyd와 Steinberg의 오차 확산 방법, [8]에서 제안한 방법과 본 논문에서 제안하는 방법을 적용한 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

4.2. 실험 2. Lena 영상을 이용한 실험

입력 영상으로서 256×256 의 사이즈를 갖는 Lena 영상을 사용하여 실험을 하였다. Floyd-Steinberg 방식을 적용한 출력 이진 영상은 Fig. 3(a)에 나타내었다. [8]에서 제안된 방법에 의한 결과는 Fig. 3(b)에 나타내었다. 제안하는 동적 오차 확산 방법을 이용한 이진 영상은 Fig. 3(c)에 나타나 있다. 제안한 알고리즘의 적용은 실험 1에서 설명한 방법과 같다. Fig. 3(a)나 (b)에서는 모자의 윗 부분, 얼굴의 왼쪽, 그리고 어깨 부분 등에 눈에 거슬리는 패턴들이 보인다. Fig. 3(a)나 (b)에서 패턴이 나타나는 부분들을 제안한 방식에 의한 결과인 Fig. 3(c)와 비교할 때 원하지 않는 패턴들이 훨씬 감소했음을 알 수 있다.

Fig. 3. Experimental results with lena image.

5. 결 론

대표적인 오차 확산 기법인 Floyd-Steinberg 방식에

서 고려되는 주위 화소들의 위치와 오차 확산 계수들의 값은 경험에 의해 결정된 것이다. 이 방식에 의해 얻어진 이진 영상에는 원하지 않는 패턴들이 나타나게 된다. 이를 개선하기 위하여 [8]에서 적응적 오차 확산 방법이 제안되어 패턴의 일부를 감소시키는 결과를 얻을 수 있었다. 본 논문에서는 이를 더욱 개선시키기 위하여 인간의 시각 인식 특성을 나타내는 저역 필터를 가중 오차 기준에 추가하고 계산 방식에서도 3×3 영역내의 모든 화소들을 주위 화소로서 사용하는 새로운 오차 확산 계수 계산 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘을 연속계조 영상에 적용한 결과 제안한 알고리즘에 의해 얻어진 이진 영상에서 원하지 않는 패턴이 훨씬 감소함을 알 수 있었다.

인 용 문 헌

1. 산업기술정책연구소, "2000년을 향한 산업 기술 개발 수요: 컴퓨터 및 주변 기기 분야", pp. 49-56, 산업기술정책연구소.
2. C. Gotsman and J. P. Allebach, "Bounds and algorithms for dither screens", *SPIE*, **2657**, 483-492 (1996).
3. T. Mitsa and K. J. Parker, "Digital halftoning using a blue noise mask", *SPIE*, **1452**, 47-56 (1991).
4. R. A. Ulichiney, *Digital Halftoning*, Cambridge MA: MIT Press, 1987
5. R. A. Ulichiney, "Dithering with Blue Noise", *Proceedings of the IEEE*, **76**(1), 56-79, January (1988).
6. R. Floyd and L. Steinberg, "An Adaptive Algorithm for Spatial Gray Scale", *SID International Symposium, Digest of Technical Papers*, pp. 36-37, 1975.
7. J. F. Jarvis et al., "A Survey of Techniques for the Display of Continuous Tone pictures on Bilevel Displays", *Computer Graphics and Image Processing*, **5**, 13-40 (1976).
8. P. W. Wong, "Adaptive Error Diffusion and its ap-

lication in Multiresolution rendering", *IEEE Trans. On Image Processing*, **5**(7), 1184-1196 (1996).

9. Shiau and Z. Fan, "A Set of easily Implementable Coefficients in Error Diffusion with Reduced Worm Artifacts", *SPIE Conf. on Color Imaging: Device Indep. Color, Color hard copy, and Graphic Arts*, **2658**, (1996).
10. 박장식, 이을환, 손경식, 김재호, "상관패턴을 감소시키는 오차 확산 계수", 제5회 한국 화상학회 학술발표회 논문집, pp. 61-69 (1996).
11. Z. Fan, "Error diffusion with a more symmetric error distribution", *SPIE Conf. on Human Vision, Visual Processing, and Digital Display V*, **2179**, 150-158 (1994).
12. J. H. Kim et al., "New Edge-Enhanced Error Diffusion Algorithm Based on the Error Sum Criterion", *Journal of Electronic Imaging*, **4**(2) 172-178, April (1995).
13. J. Sullivan, L. Ray, and R. Miller, "Design of Minimum Visual Modulation Halftoning Pattern", *IEEE Trans. on SMC*, **21**(1), 34-39, Jan/Feb. (1991).
14. R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Digital Image Processing*, Addison Wesley Press.

김 승 우



- 1994년 2월 인하대학교 전기공학과 학사
- 1996년 7월 인하대학교 전기공학과 석사
- 현재 LG전자 미디어통신 연구소 연구원

강 기 민



- 1995년 2월 인하대학교 전기공학과 학사
- 1997년 2월 인하대학교 전기공학과 석사
- 현재 인하대학교 전기공학과 박사과정
- 관심분야
칼라영상처리

김 춘 우



- 1983년 2월 서울대학교 제어계측공학과 학사
- 1985년 12월 Purdue대학교 전기공학과 석사
- 1989년 8월 Purdue대학교 전기공학과 박사
- 1994년 2월 Graphic Research Lab., 3M Co. 연구원
- 현재 인하대학교 전기공학과 부교수
- 관심분야
영상 입출력 장치를 위한 영상처리