

무작위 공간 채움 곡선을 이용한 하프토닝의 개선 방안

조청운

동서대학교 디지털콘텐츠학부

A Study on Improvement of Halftoning using Random Space Filling Curve

Cheung-Wonn Jho

Division of Digital Contents, DongSeo University

요약 본 논문에서는 무작위 공간 채움 곡선을 스캐닝 경로로 사용하는 디지털 하프토닝 방법에 대한 문제점과 개선 방안에 관해 제시한다. 무작위 공간 채움 곡선은 공간 채움 곡선의 자기 유사성으로 인한 단점을 해소하기 위한 방법으로 제안되었다. 스캐닝 경로에 무작위성을 도입하여 일정한 밝기를 가진 영역에서 발생할 수 있는 규칙적인 패턴을 줄이기 위해 사용되었다. 그러나 무작위 공간 채움 곡선을 사용한 하프토닝에도 일부 영역에서 경로를 따라 밝기가 지나치게 밝아지는 결과를 보일 수 있는 문제점이 발생한다. 본 논문에서는 이러한 문제점의 원인을 제시하고 이를 해결할 수 있는 방법으로써 단일 화소로 제한된 확산 방식을 제시한다. 이러한 방식은 효과적으로 오차의 과다 누적을 막아주며 하프토닝에도 개선된 결과를 보여준다.

주제어 : 디지털 하프토닝, 오차 확산, 무작위 공간 채움 곡선, 스캐닝, 신장 트리

Abstract In this paper, we proposed problem and improvement of halftoning using random space filling curve. Random space filling curve is developed as a solution for shortcoming which space filling curve has self-similarity. It is used to reduce regular pattern can be occurred in constant brightness area in order that randomness apply to scanning path. But there is a problem that some area along scanning path can show too bright result in halftoning using random space filling curve. In this paper, we analyzed cause of problem and proposed single pixel error diffusion as a solution method. This method can avoid over-accumulated error and show better result in halftoning.

Key Words : Digital Halftoning, Error Diffusion, Random Space Filling Curve, Scanning, Spanning Tree

1. 서론

디지털 하프토닝은 여러 비트의 밝기 단계로 표현되는 연속적인 톤의 디지털 이미지를 흑백의 두 단계로만 표현되는 이미지로 변환하는 영상 처리 기법이다. 오차

확산 방법은 디지털 하프토닝의 한 가지 기법으로 연속적인 그레이스케일 이미지를 흑백 이미지로 한 픽셀씩 변환하면서 두 영상의 대응되는 픽셀간의 밝기 차이를 주변으로 확산시켜 줌으로써 결과 이미지의 품질을 향상시켜주는 방법이다[1,2,3].

Received 1 December 2013, Revised 7 January 2014

Accepted 20 January 2014

Corresponding Author: Kil-Dong Hong(The Society of Digital Policy)

Email: paper@policy.or.kr

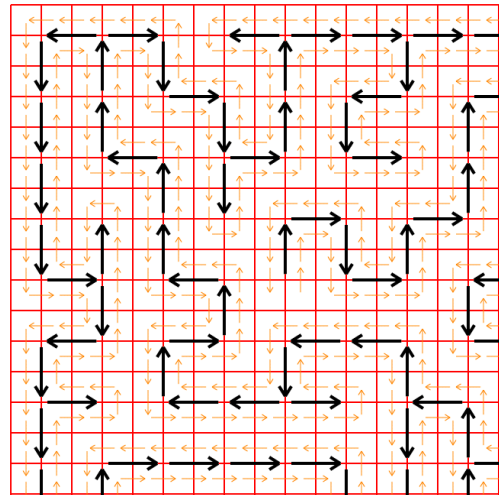
ISSN: 1738-1916

© The Society of Digital Policy & Management. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

본 논문에서는 디지털 하프토닝 알고리즘 중에서 Asano에 의해 제안된 무작위 공간 채움 곡선(random space filling curve)을 이용한 디지털 하프토닝 알고리즘 [4,5]에 관련된 문제를 다룬다. 무작위 공간 채움 곡선을 따라가며 그 주변 화소들에 오차를 확산하는 방법으로 이러한 방식의 다중 픽셀에 오차를 확산할 경우 부분적으로 매우 밝아질 수 있는 문제점과 원인을 다룬다. 또 이를 효과적으로 해결하기 위한 방법으로 단일 화소에만 오차를 확산하는 방법을 제시한다.

2. 기존 연구

오차확산 방법에서 가장 대표적인 기법은 Floyd와 Steinberg에 의해 개발된 오차 확산법이 가장 대표적이라고 할 수 있다[7]. 이미지의 상단에서 아래로, 좌측에서 우측으로 형상을 차례로 한 화소씩 스캔하는 방법을 사용하며 아직 처리되지 않은 네 개의 이웃 화소들에 고정된 비율로 오차를 확산한다. 오차 확산법에는 이와 같이 래스터 스캔을 이용하면서 확산되는 범위와 가중치를 다르게 하는 다양한 방법이 개발되었다. 그러나 이러한 스캔의 방향으로 특성으로 인해 하프토닝의 결과 영상에 일정한 방향으로 흐르는 패턴이 발생하기도 한다. 이러한 스캔 방법을 개선하기 위해 계속 방향을 바꾸며 진행할 수 있게 하고자 하는 방법이 공간 채움 곡선을 이용한 방법이다. 공간 채움 곡선은 2차원의 단위 사각형 전체를 덮을 수 있는 곡선으로 1890년 Giuseppe Peano에 의해 발견되었다. 이러한 곡선에는 Peano 곡선, Hilbert 곡선, Sierpinski 곡선 등이 있으며 공간 내의 모든 점을 순차적으로 방문할 수 있는 방법을 제공한다. 이러한 특성 때문에 유한한 크기의 디지털 이미지에 대해 화소를 순차적으로 방문할 수 있게 된다. 또한 자기 유사성으로 인한 특성으로 인해 기존의 래스터 스캔이나 지그재그 형태의 스캔에서 발생할 수 있는 패턴을 줄여 주는 효과가 있다. 디지털 하프토닝에는 Witten에 의해 처음 사용되었으며 [8], Velho에 의해 새로운 방법으로 활용되기도 하였다 [9]. 그러나 이러한 공간 채움 곡선은 방향이 계속 바뀌는 영상 처리 순서에 일정한 패턴을 줄여 주기도 하지만 자기 유사성 때문에 독특한 또 다른 형태의 패턴을 발생시키기도 한다.

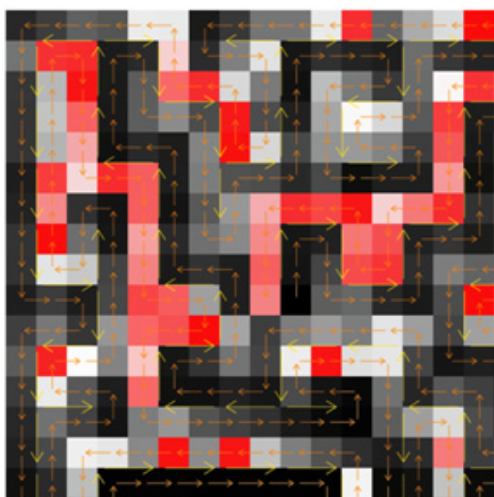


[Fig. 1] Spanning tree and random space filling curve.

이러한 문제점을 해결하기 위해서 하프토닝에 사용하는 클러스터 크기를 적응적으로 적용하는 방법을 사용하였다[10,11]. 또 다른 접근 방법으로 해결하기 위한 방법 중 하나가 공간 채움 곡선에 무작위성을 도입한 방법이다[4,5,6].

공간 채움 곡선이 재귀적인 규칙에 의해 지속적으로 방향을 바꾸면서 공간을 채우지만 이 또한 유사한 패턴이 있다. 이를 줄이기 위해 도입한 무작위 공간 채움 곡선은 신장 트리(spanning tree)를 이용하여 생성한다[4].

무작위 공간 채움 곡선은 [Fig. 1]에서 보인 형태처럼 2x2의 화소를 단위로 무작위로 격자 형태를 채우는 신장 트리를 먼저 구축하고 스페닝트리의 양쪽 면을 오가는 형태의 커브를 구축하여 생성한다. 이렇게 만들어진 무작위 공간 채움 곡선은 기존의 공간 채움 곡선처럼 이미지 내의 모든 화소들을 순차적으로 방문할 수 있는 방법을 제공한다. 이러한 성질을 이용하여 래스터 스캔 방식 대신에 사용하여 하프토닝을 할 수 있다. 그러나 이러한 하프토닝에는 결과 이미지에 지나치게 밝은 부분이 발생하는 문제점이 발생할 수 있다. 이러한 문제점의 원인과 해결 방안에 대해 3장에서 설명한다.



[Fig. 2] Scanning path and accumulated error.



[Fig. 3] Scanning path and result image.

3. 문제점과 개선 방안

3.1 문제점과 기존의 해결 방법

무작위 공간 채움 곡선을 스캐닝 경로로 사용하여 하프토닝을 할 경우 결과 영상에 원 영상보다 밝게 표현되는 현상이 발생할 수 있는데 [Fig. 4]와 [Fig. 5]의 첫 번째 결과 영상에서 확인할 수 있다. 이러한 방법을 제안한 Asano의 경우 이러한 문제점을 해결하기 위해 두 가지 방법을 사용하고 있는데 첫 번째 방법은 확산되는 오차

를 줄여서 먼 곳으로 확산되는 것을 막는 기법이다[4]. 화소에서 발생한 약 76%의 오차만 주변의 화소로 확산되도록 하는 방법을 사용하고 있다. 여기에서는 확산된 오차가 너무 멀리 퍼져나가는 것으로 분석하여 너무 멀리 오차가 확산되지 않도록 제한을 하여 해결하려는 방법이나 영상의 밝기에 손실이 발생할 수 있다는 문제점이 있다. 오차 확산 방법은 본질적으로 영상의 전체의 밝기가 하프토닝된 영상에서도 보존한다는 점을 지키지 못하게 된다. 따라서 본 논문에서는 이 방법은 배제하고 실험하였다. 두 번째 방법은 화소가 먼저 처리된 주변 화소로부터 오차를 받은 횟수에 따라 반비례해서 오차를 분배하는 기법이다[5]. 확산되는 오차가 지나치게 많이 누적되는 것을 막기 위해 적응적으로 효과적인 분배를 사용하여 해결하려는 방법이다. 결과 영상인 [Fig. 4]와 [Fig. 5]에서 두 번째 영상이 이러한 방법을 적용한 경우이다. 이러한 방법은 다소 문제점을 줄이는 효과는 있지만 근본적으로 완전히 해결 하지는 못하고 있다.

3.2 발생 원인 분석

이러한 문제가 생기는 원인은 무작위 공간 채움 곡선을 생성하는 방법에 있다. 신장 트리를 중심으로 양쪽으로 왕복하며 경로가 만들어지기 때문이다. 신장 트리를 중심으로 먼저 스캔되는 위치의 화소들에서는 나중에 스캔되는 화소들을 향해 오차를 확산한다. 이러한 이유 때문에 상대적으로 주변 화소들보다 먼저 스캔되는 화소들에서는 상대적으로 나중에 스캔되는 화소들에 오차를 확산을 많이 하기 때문에 누적은 적게 된다. 따라서 하프토닝의 결과도 어둡게 나온다. 이와 반대로 신장 트리를 중심으로 상대적으로 나중에 스캔되는 화소들은 확산된 오차를 주변에서 지나치게 많이 누적하게 되며 주변의 화소는 대부분 처리가 끝난 후라서 확산은 경로 상의 다음 화소에만 오차를 확산할 수 있게 된다. 따라서 상대적으로 나중에 처리되는 스캔 경로 상의 화소들은 하프토닝의 결과도 너무 밝게 만들어 진다. 즉, 먼저 처리되는 경로에서는 오차를 확산은 많이 하나 누적은 적게 되고 나중에 처리되는 경로에서는 누적은 많이 되는 반면 확산이 적게 되는 것이다. 이는 [Fig. 2]와 [Fig. 3]에 부분 확대된 영상에서 좀 더 자세히 볼 수 있다. [Fig. 1]에서 [Fig. 3]까지는 실험에 사용된 경로와 결과 영상에서 좌상단의 16x16 크기의 영역을 확대한 것이다. [Fig. 2]에서

는 스캐닝 경로의 진행을 나타내는 화살표와 함께 각 화소별로 누적된 오차를 밝기로 표현하고 있다. 빨간색으로 표시된 경우에는 누적된 오차가 256 이상인 경우이며 이러한 부분에서 원영상보다 지나치게 밝게 하프토닝될 가능성이 높다. [Fig. 2]에서 누적된 오차가 큰 경우에는 [Fig. 3]에서 흰색 화소인 부분과 대부분 일치하고 있다.

3.3 제안된 해결 방법

이러한 문제점을 개선하기 위해서는 원인에서 알 수 있는 것처럼 스캐닝하는 경로 상에서 처리하는 순서의 차이가 많은 화소간 오차확산을 제한하는 것이 효과적인 방법이다. 영상 내의 화소를 처리하는 순서대로 나열하면 다음과 같다.

$$I = \{p_0, p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_j, \dots, p_{n-1}\}$$

각 화소에 대해 하프토닝을 처리하는 과정에서 화소 p_i 에서 발생하는 오차 $E(p_i)$ 는 아직 처리되지 않은 화소 p_j 로 확산하게 된다. 이때 처리되지 않은 이웃 화소들에 균등하게 배분할 경우 p_i 에서 p_j 로 확산되는 오차는 다음과 같다.

$$e(p_i \rightarrow p_j) = \frac{E(p_i)}{n(p_i)}$$

여기서 $n(p_i)$ 는 p_i 주변에 아직 처리되지 않은 화소의 수이다.

3.2절에서 설명한 것처럼 오차가 누적되는 것을 막기 위해서 본 논문에서 제안하는 개선 방법으로 무작위 공간 채움 곡선을 따라 스캔하는 경로 상에 있는 다음 화소에만 오차를 확산하는 방법을 사용하는 것이다. 이에 따라 본 논문에서 제안하는 방법으로 주변에 확산되는 오차를 나타내면 다음과 같다.

$$e(p_i \rightarrow p_j) = \begin{cases} E(p_i), & j = i + 1 \text{ 일 경우} \\ 0, & j \neq i + 1 \text{ 일 경우} \end{cases}$$

이러한 방법은 오차를 받고 오차를 확산시키는 화소가 각각 하나씩으로만 제한됨으로써 256이상 누적되는 오차가 발생하지 않으며 바로 이웃하는 화소에서 확산된 오차를 하프토닝 결과에 반영할 수 있다는 장점이 있다.

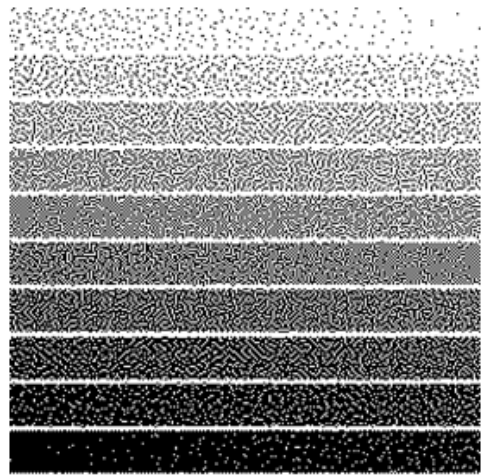
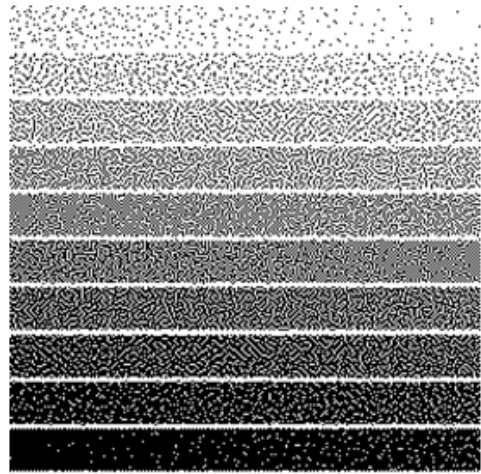
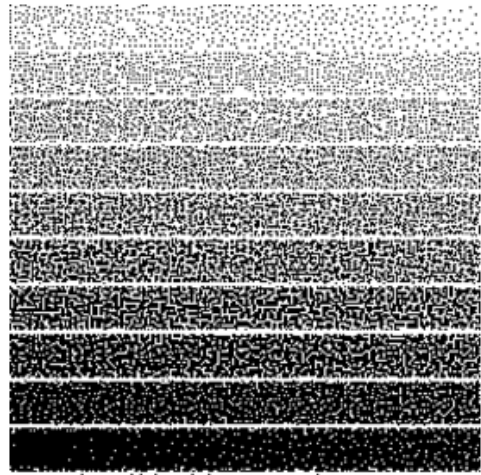
이는 [Fig. 6]의 세 번째 영상과 [Fig. 7]의 세 번째 영상에 보인 것처럼 누적된 오차를 시각화한 영상에서도 확인 할 수 있다. 이러한 방식으로 오차 확산을 하나의 이웃 화소로 제한하는 방법은 공간 채움 곡선에 대해 적용된 바 있으나[8] 무작위 공간 채움 곡선에 대해 적용된 경우는 처음이다. 또한 공간 채움 곡선과 달리 무작위 공간 채움 곡선은 처리 경로에 무작위성이 포함되어 있기 때문에 영상품질에 규칙적인 패턴을 효과적으로 줄이면서 영상의 품질에도 기존의 오차확산에서 발생한 문제점을 해결할 수 있다.

3.4 실험 결과

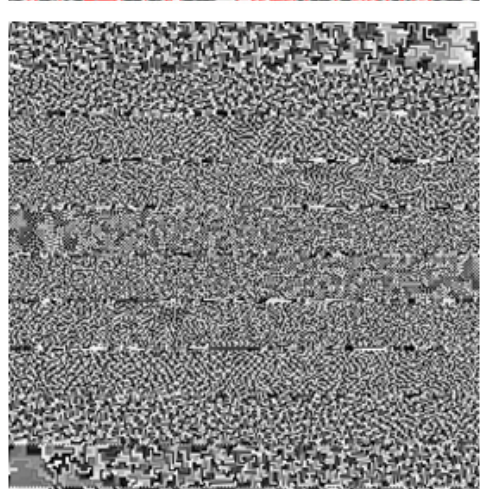
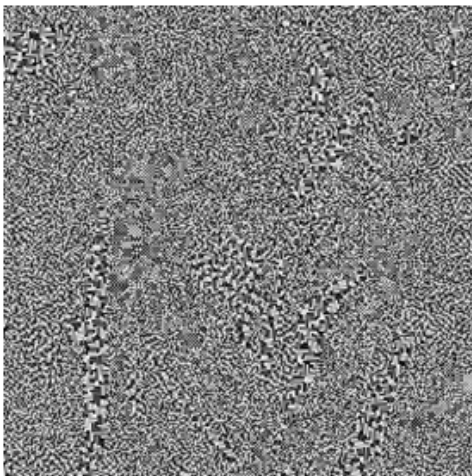
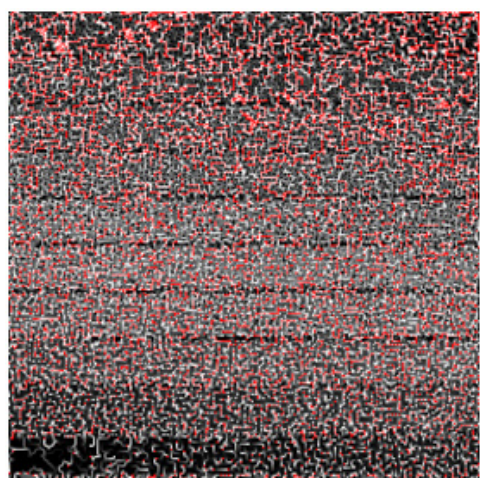
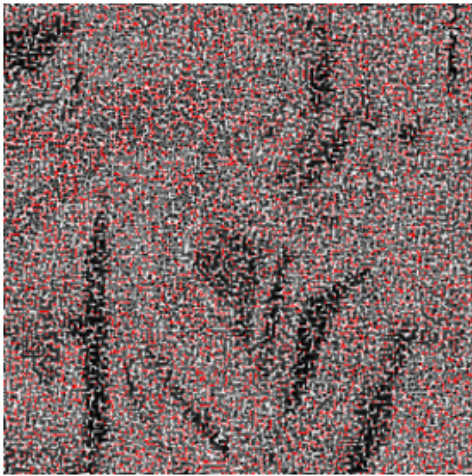
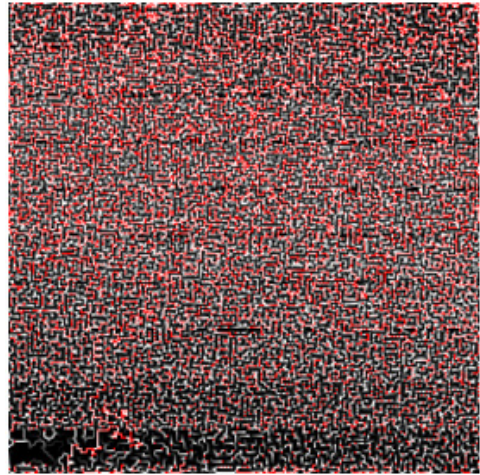
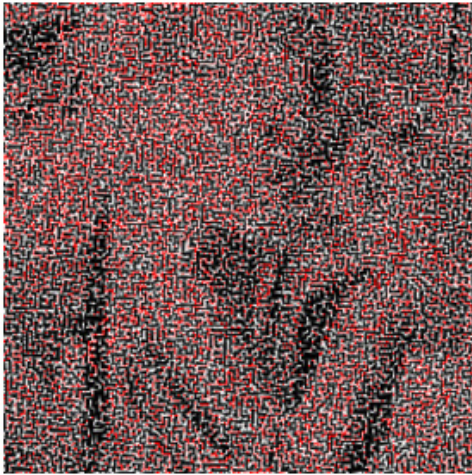
본 논문에서는 같은 무작위 공간 채움 곡선에 대해서 세 가지 오차 확산 하프토닝을 실험하였다. 첫 번째 방법은 곡선 경로를 따라가며 하프토닝을 수행한 후 발생한 오차를 아직 처리되지 않은 화소에 균등하게 배분하는 방법이다. 두 번째 방법은 [4]에 사용된 오차 확산 방법을 사용하였다. 세 번째 방법은 곡선 경로를 따라가며 하프토닝을 수행한 후 발생한 오차를 곡선 경로 상에 있는 다음 화소에만 확산하는 방법이다. 실험에 사용한 영상은 256x256 크기의 Barbara 영상이며 [Fig. 4]에 나타내었다. [Fig. 5]에 나타낸 영상은 256x256 크기의 ramp 영상에 적용한 실험 결과로 위에서부터 각각 세 가지 방법을 차례로 적용하였다. [Fig. 4]와 [Fig. 5]에서 하프토닝을 통해 얻은 결과 영상이며 [Fig. 6]과 [Fig. 7]에는 하프토닝 과정에서 주변 화소에 확산된 누적 오차를 시각화한 영상이다. 각각의 화소의 밝기는 확산된 오차를 나타내며 밝은 수록 많은 오차가 누적되었음을 나타낸다. 그 중에 빨간색으로 표시된 화소들은 누적된 오차가 256을 넘는 경우이며 이러한 부분에서 주로 결과 영상에 문제가 발생한다. 첫 번째 방법에서 가장 많이 발생하는 것을 관찰할 수 있으며 하프토닝의 결과에서도 확인할 수 있다. 두 번째 방법에서는 다소 줄어든 것을 볼 수 있으나 완전히 문제점이 제거되는 것은 아니다. 세 번째 방법에서는 누적된 오차가 256을 넘는 경우가 전혀 발생하지 않는다. 결과 영상에서도 문제점이 완전히 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다.



[Fig. 4] Halftoning result of Barbara image



[Fig. 5] Halftoning result of ramp image



[Fig. 6] Accumulated error of Barbara image

[Fig. 7] Accumulated error of ramp image

4. 결론

본 논문에서는 무작위 공간 채움 곡선을 따라 오차를 주변 화소에 확산시키는 디지털 하프토닝 방법에서 발생할 수 있는 문제점과 그 원인을 제시하였다. 동일한 패스를 사용하더라도 입력 영상에 따라 누적되는 오차는 차이를 보인다. 그러나 하프토닝의 결과에서 발생할 수 있는 문제점의 원인은 동일하다고 볼 수 있다. 본 논문에서는 이러한 원인을 시각화 하여 보이고 있으며 이에 대한 해결 방안을 제시한다. 또한 발생 원인에 맞게 단일 화소에 확산시키는 방법을 제안하였으며 이에 따른 실험 결과를 보였다. 제안된 방법은 하프토닝을 처리하는 경로를 따라 다음 화소에만 오차를 확산하고 다른 화소에는 확산을 제한하는 방법으로 오차가 과다 누적되는 부분이 생기지 않도록 하는 방법이다. 실험 결과에서도 기존에 방법에서와 같은 문제점이 나타나지 않는 것을 확인할 수 있었다. 다만 단일 화소에 오차를 확산하는 방법은 스캔 경로를 따라 1차원적인 오차확산을 하는 것과 같다고 볼 수 있기 때문에 2차원으로 이웃하는 화소 구조를 충분히 활용한다고 보기 어렵다는 한계를 갖는다. 향후 본 논문에서 제시한 문제 원인 분석을 바탕으로 좀 더 좋은 개선 알고리즘이 제시될 수 있으리라 기대한다.

REFERENCES

[1] B. E. Bayer, An optimum method for two level rendition of continuous-tone pictures. In IEEE Internatioal Conference on Communicatinos, Conference Record, pp.11-15, Seattle, Washington, USA, June 11-13, 1973.

[2] R. A. Ulichney, Digital Halftoning. MIT Press, Cambridge, MA, 1987.

[3] D. L. Rau and G. R. Arce, Modern Digital Halftoning. CRC Press, 2nd ed., 2008.

[4] T. Asano, Digital halftoning algorithm based on random space-filling curve. Proceedings. International Conference on Image Processing, Vol. 1, pp.545-548, 1996.

[5] T. Asano, Digital halftoning algorithm based on radom space-filling curve. IEICE Trans.

Fundamentals, Vol.E82-A, No.3 March 1999.

[6] K. Inoue and K. Urahama, "Halftoning with minimum spanning trees and its application to maze-like images. Computer & Graphics 33, pp.638-647, 2009.

[7] R. Floyd and L. Steinberg, An adaptive algorithm for spatial gray scale. SID Symposium, pp.36-37, 1975.

[8] I. H. Witten and R. M. Neal, Using peano curves for bilevel display of continuous-tone images. IEEE Computer Graphics and Applications, 2:47-52, May 1982.

[9] L. Velho and J. de Miranda Gomes, Digital halftoning with space filling curves. Computer Graphics (SIGGRAPH '91 Proceedings), Vol. 25, No. 4, pp.81-90, July 1991.

[10] L. Velho and J. Gomes, Stochastic screening dithering with adaptive clustering. Computer Graphics (SIGGRAPH '95 Proceedings), pp.273-276, August 1995.

[11] T. Wong and S. Hsu, Halftoning with selective rrecipitation and adaptive clustering. Graphics Gems V, pp.302-313, Edited by Alan Paeth, AP Professional, 1995.

조 청 운(Jho, Cheung Woon)



- 1992년 2월 : 중앙대학교 전자계산학과(공학사)
- 1994년 2월 : 중앙대학교 컴퓨터공학과(공학석사)
- 2004년 3월 ~ 현재 : 동서대학교 디지털콘텐츠학부 교수
- 관심분야 : 컴퓨터 그래픽스, 컴퓨터 게임

· E-Mail : cwjho@naver.com