

유연한 로지스틱 변환함수를 이용한 영상의 히스토그램 평활화

Image Histogram Equalization Using Flexible Logistic Transformation Function

조용현

Yong-Hyun Cho

대구가톨릭대학교 공과대학 컴퓨터정보통신공학부

e-mail : yhcho@cu.ac.kr

요 약

본 논문에서는 영상의 화질개선을 위해 로지스틱 함수에 기반을 둔 히스토그램 평활화 방법을 제안하였다. 여기서 히스토그램 평활화는 영상의 밝기를 조정함으로써 화질을 개선하는 간단하고 효과적인 공간영역 기반 처리기법이다. 또한 로지스틱 함수는 비선형의 변환함수로 영상의 명암도 발생빈도에 따라 밝기개선 정도를 적응적으로 조정하기 위함이다. 특히 영상의 히스토그램에서 최대 발생빈도를 가지는 명암도와 최대 명암도 및 전체 픽셀수만을 이용한 유연한 비대칭의 로지스틱 함수를 제안함으로써, 기존 로지스틱 함수에서의 지수함수 계산 부담과 최적의 계수 값을 경험적으로 사전에 설정해야 하는 제약을 해결하였다. 제안된 기법을 다양한 크기의 해상도와 히스토그램 분포를 가지는 영상을 대상으로 실험한 결과, 기존의 히스토그램 평활화와 적응적 변형 히스토그램 평활화보다도 우수한 화질개선 성능과 빠른 평활화 속도가 있음을 확인하였다. 또한 제안된 기법은 멀티미디어 시스템에서 실시간 평활화 기법으로도 충분히 이용될 수 있음을 확인하였다.

키워드 : 히스토그램 평활화, 로지스틱 함수, 화질개선, 공간영역 영상처리

Abstract

This paper presents a histogram equalization based on the logistic function for enhancing the quality of images. The histogram equalization is a simple and effective spatial processing method that it enhances the quality by adjusting the brightness of image. The logistic function that is a nonlinear transformation function is applied to adaptively enhance the brightness of the image according to its intensity level frequency. We propose a flexible and asymmetrical logistic function by only using the intensity level with maximum frequency and the maximum intensity level in an histogram, and the total number of pixels. The proposed function excludes both the computation load of an exponential function and the heuristic setting of an optimal parameter values in the traditional logistic function. The proposed method has been applied for equalizing many images with a different resolution and histogram distribution. The experimental results show that the proposed method has the superior enhancement performances and the faster equalizing speed compared with the traditional histogram equalization and the adaptively modified histogram equalization, respectively. And the proposed histogram equalization can be used in various multimedia systems in real-time.

Key Words : Histogram Equalization, Logistic Function, Image Enhancement, Spatial Image Processing

1. 서 론

영상과 음성 등의 정보를 디지털 처리하는 기술의 발전에 따라 멀티미디어 기술과 장치들에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 특히 전달되는 영상에서는 화질향상의 요구가 높아지고 있어, 그에 따른 양질의 영상정보를 처리·가공하여 전송하려는 다양한 방법들이 연구되고 있다[1-3].

일반적으로 영상의 획득과정에 포함되는 조명의 세기에

따라서는 특징을 잘 나타내지 못하거나 식별이 불가능한 화질의 영상이 얻어 질 수 있다. 이러한 영상의 화질개선을 위해서 표현하고자 하는 명암도(light intensity) 범위인 동적영역을 늘리는 방법들이 있으며, 히스토그램 평활화(histogram equalization)가 가장 널리 이용되고 있다 [1-10]. 히스토그램은 가장 일반적인 영상의 표현도구이며, 이는 샘플사이 그 척도의 정량화된 빈도수이다. 영상에서 히스토그램은 명암도의 발생빈도를 나타낸 것으로 명암에 대한 분포를 보여주며, 입력되는 영상의 밝기 및 명암대비 등에 대한 정보를 잘 나타낸다[3,9].

히스토그램 평활화는 히스토그램을 이용하여 변환함수를

접수일자 : 2009년 9월 2일

완료일자 : 2009년 11월 20일

었고, 이를 이용하여 영상의 각 명암도들의 동적영역을 재조정함으로써 화질을 개선하는 공간영역에 기반을 둔 기법이다[1-9]. 변환함수로 누적분포함수(cumulative density function : CDF)를 사용하기 때문에 변환 후 평탄한 분포를 가지는 히스토그램이 생성된다. 여기서 동적영역의 증감정도는 영상에서 명암도의 발생빈도에 비례한다. 또한 히스토그램 평활화는 새로운 명암도가 추가되는 것이 아니라 다른 값으로 대체되어 영상의 전체 명암도 개수는 동일하다. 따라서 히스토그램 평활화는 원 영상이 가지는 히스토그램의 형태는 왜곡시키지 않고 전체적으로 히스토그램의 분포를 균등하게 한다[1-3].

하지만 기존 히스토그램 평활화(traditional histogram equalization : THE)는 히스토그램에 의한 변환함수에만 의존하므로 평활화 후 결과영상의 밝기가 과도하게 변하는 단점이 있다. 또한 평활화의 변환함수는 발생빈도가 큰 명암도 부분에서는 가파른 기울기를 가지며 그렇지 않은 부분에서는 완만한 기울기를 가지므로, 원 영상 내에서 특정 명암도들의 발생빈도가 매우 많거나 작을 경우 그것으로부터 계산된 변환함수에 의해 오히려 화질이 떨어지는 결과영상을 얻을 수도 있다[9]. 이러한 THE가 가지는 문제점을 해결하기 위한 많은 기법들이 제안되었다. 지금까지 제안된 기법들을 크게 나누면 원 영상의 명암도를 유지하기 위해 원 영상을 부분영상으로 분할하여 평활화를 수행하는 기법과 명암도의 지나친 변화를 억제하기 위해 히스토그램을 제한하여 변환함수를 얻어 평활화를 수행하는 기법으로 나눌 수 있다. 전자의 기법에는 명암도보존 양히스토그램 평활화(brightness preserving bi-histogram equalization : BBHE)[4], 반복적 평균분할 히스토그램 평활화(recursive mean-separate histogram equalization : RMSHE)[5], 최소평균 명암도 오차 양히스토그램 평활화(minimum mean brightness error bi-histogram equalization : MMBEBHE)[6]이 있으며, 후자의 기법에는 대비제한 적응 히스토그램 평활화(contrast limited adaptive histogram equalization : CLAHE)[7], bin underflow and bin overflow(BUBO)[8], 적응적 변형 히스토그램 평활화(adaptively modified histogram equalization : AMHE)[9]가 있다. 이상의 제안된 기법들은 대칭적인 명암도 분포, 어느 영역에 집중된 명암도 분포, 그리고 비슷한 명암도 분포의 히스토그램을 가지는 특정 영상들에서만 우수한 개선 성능을 가진다. 하지만 히스토그램의 대칭성이나 세밀한 부분의 향상 및 평활화에 걸리는 시간 등에서 화질 개선 정도의 한계가 있어 다양한 종류의 멀티미디어 영상처리에는 제약이 있다[9]. 따라서 다양한 히스토그램 분포를 가지는 일반적인 영상에서도 우수한 화질개선 성능을 가지면서 평활화에 소요되는 계산부하의 감소를 위한 대안 제시가 절실하게 요구된다.

본 논문에서는 로지스틱(logistic) 함수[11,12]에 기반을 둔 히스토그램 평활화를 이용한 효율적인 화질 개선방법을 제안한다. 여기서 히스토그램 평활화는 영상의 밝기를 조정함으로써 화질을 개선하는 간단하고 효과적인 공간영역 기반 처리기법이다. 특히 영상의 히스토그램에서 최대 발생빈도를 가지는 명암도와 최대 명암도 및 전체 픽셀(pixel)수만을 이용한 유연한 비대칭성의 s-자형 로지스틱 함수를 제안함으로써 기존 로지스틱 함수에서의 지수함수 계산과 최적의 계수 값을 경험적으로 사전에 설정해야하는 제약을 해결하였다. 제안된 기법을 다양한 크기의 해상도와 히스토그램 분포를 가지는 영상을 대상으로 실험하고, 그 결과들

을 기존의 THE와 AMHE 기법의 결과들과 각각 비교·고찰하였다.

2. 영상의 화질개선

디지털 영상의 화질을 개선하기 위한 접근에는 공간영역에 기반을 둔 방법과 주파수 영역에 기반을 둔 방법으로 나뉘어진다[2]. 공간영역에 기반을 둔 방법은 영상의 픽셀을 직접 조작하는 것이고, 주파수 영역에 기반을 둔 방법은 푸리에(Fourier) 변환에 근간을 둔 것이다. 그 중에서도 계산의 간단함과 구현의 용이함을 가지는 히스토그램 처리법은 공간영역 기반 기법으로 실시간 영상처리에 널리 이용되고 있으며, 여기에는 히스토그램 평활화와 명암대비 스트레칭(contrast stretching)이 있다[1-3,9].

히스토그램 평활화는 히스토그램의 누적분포에 의한 변환함수로 영상의 각 명암도들의 동적영역을 재조정하는 방법이다. 명암대비 스트레칭은 영상에서 명암도의 최소값과 최대값의 비율을 이용하여 히스토그램을 표현 가능한 최소 명암도와 최대 명암도로 펼치는 방법이다. 하지만 명암대비 스트레칭은 낮은 명암대비를 가지는 영상과 히스토그램의 분포가 가우시안(Gaussian)이거나 그와 유사한 분포의 영상에 적합하다. 여기에서는 영상의 화질개선에 가장 널리 이용되고 있는 히스토그램 평활화를 중심으로 기존의 THE와 AMHE 방법에 대해서 서술한다.

2.1 기존의 히스토그램 평활화

영상의 획득과정에서 조명의 세기가 지나치게 강하거나 약할 경우 영상의 명암대비는 빈약하며, 그에 따른 히스토그램은 영상의 구성정보를 잘 반영하지 못하는 제약이 있다. 이러한 빈약한 명암대비의 제약을 해결하기 위해 히스토그램 평활화가 이용된다[1-3].

픽셀의 2차원 좌표 (i, j) 에서 L 개의 명암도 $\{X_0, X_1, \dots, X_{L-1}\}$ 로 구성된 원 영상 $X = \{X_k(i, j)\}$ 에 대한 히스토그램은 확률밀도함수(probability density function : PDF) $p(X_k)$ 로 정의되며 식 (1)과 같다.

$$p(X_k) = n_k/n, \text{ for } k=0,1, \dots, L-1 \quad (1)$$

여기서 n 과 n_k 는 각각 원 영상 X 의 전체 픽셀수와 명암도 X_k 의 픽셀수이며, PDF $p(X_k)$ 는 명암도 X_k 의 발생빈도를 나타내는 히스토그램이다. 히스토그램은 픽셀들에 의한 영상내의 명암분포를 나타냄으로써 영상의 특징들을 가지게 된다. 한편 식 (1)의 PDF에 기반을 둔 누적분포함수 $c(X)$ 는 다음의 식 (2)와 같이 정의된다.

$$c(X) = \sum_{i=0}^k p(X_i), \text{ for } k=0,1, \dots, L-1 \quad (2)$$

여기서 정규화에 따라 $c(X_{L-1})=1$ 이다. 따라서 히스토그램 평활화는 원 영상의 변환함수 $f(X_k)$ 로 CDF $c(X)$ 를 이용하여 균일분포의 히스토그램을 가지는 영상으로 사상하는 것이다. 이때 사상을 위한 변환함수와 변환된 결과영상 Y 는 다음의 식 (3)과 같다.

$$f(X_k) = X_0 + (X_{L-1} - X_0) \cdot c(X) \quad (3)$$

$$Y = f(X(i, j)) | \forall X(i, j) \in X$$

한편 그림 1은 히스토그램 평활화를 위한 변환함수의 예를 나타낸 것이다[9]. 여기서 각 명암도 X_k 에 대한 변환함수 $f(X_k)$ 는 발생빈도가 높은 명암도 영역에서는 가파른 기울기를 가지며, 그렇지 않은 영역에서는 완만한 기울기를 가진다. 결국 원 영상에서 발생빈도가 높아서 변환함수의 기울기가 1보다 큰 명암도 영역은 좀 더 큰 명암도로 확산되어 대비가 증가되고, 기울기가 1보다 작은 영역은 좀 더 작은 명암도로 축소되어 대비가 감소된다.

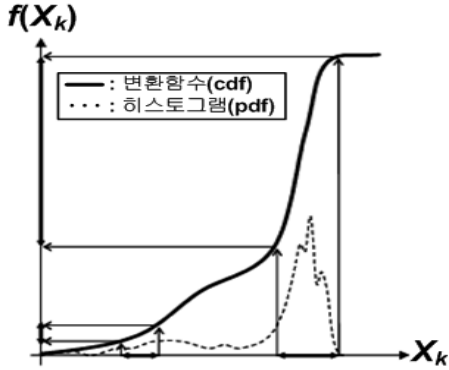


그림 1. 기존 히스토그램 평활화의 변환함수
Fig. 1. Transformation function of conventional histogram equalization

전술한 히스토그램 평활화는 전체 영상의 명암도에 기반을 둔 변환함수를 이용한다는 관점에서 전역처리 기법이다. 원 영상 내에서 특정한 명암도들의 발생빈도가 매우 높거나 낮을 경우 그것으로부터 계산된 변환함수에 의해 화질이 오히려 떨어지는 영상을 얻을 수 있다. 결국 평활화되는 영상은 전체 명암도 구간 ($X_0 \sim X_{L-1}$)에 대하여 균일한 PDF $p(X) = 1/(X_{L-1} - X_0)$ 로 구해지며, 이때 평균 명암도 $mean = (X_0 + X_{L-1})/2$ 이다[9]. 즉, 원 영상의 평균 명암도가 크든 작든 간에 평활화된 변환영상의 평균 명암도는 항상 중간 명암도를 가지며, 원 영상의 중간 명암도와 평균 명암도 간의 차이가 클수록 평활화에 의한 변환영상의 밝기는 과도하게 변한다.

2.2 AMHE의 히스토그램 평활화

전술한 THE에서의 제약을 해결하기 위해 히스토그램을 적응적으로 변형한 히스토그램 평활화 AMHE이 제안되었다[9]. AMHE는 히스토그램에서 각 명암도 발생빈도수의 크기에 따라 히스토그램을 재조정된 후, 그 히스토그램으로 얻어지는 비선형 변환함수를 기반으로 평활화를 수행하여 화질을 개선한다.

그림 2(a), (b), (c)는 AMHE에서 비슷한 명암도가 집중된 특정영역의 히스토그램, 평활화를 위한 변환함수, 히스토그램 조정 방법을 각각 나타낸 것이다[9]. 특히 그림 2(b)와 같은 변환함수의 비선형 특성은 히스토그램 상에서 명암도 발생빈도수의 크기에 따라 명암도의 변화정도를 서로 다르게 제공할 수 있어 유사한 명암도를 가지는 영역의 경계선과 같은 부분도 나타낼 수 있다[9]. 또한 그림 2(c)는 비선형 특성의 변환함수를 얻기 위한 히스토그램의 조정 방법이다.

한편 그림 2(c)에 의한 히스토그램의 조정을 위해서는 먼저, 히스토그램의 최대 발생빈도수 *highest*와 최소 발생빈도

도수 *lowest*를 각각 구하고, 이를 이용하여 평균 발생빈도수 $mid = (highest - lowest)/2$ 를 계산한다. 다음은 이들 발생빈도수를 이용하여 조정된 히스토그램 $p_{AMH}[k]$ 를 계산하며, 이때 원 영상의 히스토그램 $p[k]$ 가 mid 보다 큰 경우와 그렇지 않은 경우로 나누어 조정한다. 이렇게 하면 명암도가 집중된 발생빈도가 많은 영역에서는 발생빈도를 제한하여 영상의 과도한 밝기변화를 막을 수 있고, 발생빈도가 적은 영역에서는 부족한 발생빈도를 보상하여 밝기변화를 높일 수 있다. 히스토그램의 조정을 위한 계산을 정리 다음의 식 (4)와 같다.

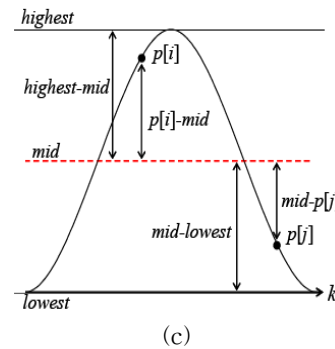
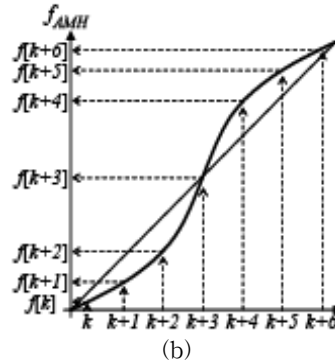
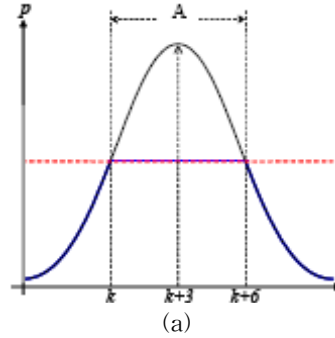


그림 2. 집중된 히스토그램(a), 변환함수(b), 히스토그램 조정방법도(c)

Fig. 2. A concentrated histogram(a), transformation function(b), adjustment method of histogram

$$p_{AMH}[k] = \begin{cases} mid + \frac{(p[k] - mid)^2}{highest - mid} \alpha, & \text{if } p[k] > mid \\ mid - \frac{(mid - p[k])^2}{mid - lowest} \alpha, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

여기서 α 는 그림 2(b)에서 중앙 직선의 선형함수와 비선형

형 함수간의 거리를 조정하는 계수로 화질의 개선정도를 제어한다. α 가 커지면 명암도의 확장정도가 증가되어 그에 따른 영상대비는 증가하게 된다. 제시된 화질개선 제어계수 α 의 계산식은 다음의 식 (5)와 같다.

$$\alpha = \begin{cases} \frac{X_m - X_{ml}}{X_\mu - X_{ml}} & \text{for } 0 \leq k \leq X_m \\ \frac{X_\mu - X_m}{X_\mu - X_{ml}} & \text{for } X_m \leq k \leq L-1 \end{cases},$$

where $X_{ml} = \sum_{k=0}^{X_m} k \cdot p[k] / \sum_{k=0}^{X_m} p[k]$, $X_\mu = \sum_{k=X_m+1}^{L-1} k \cdot p[k] / \sum_{k=X_m+1}^{L-1} p[k]$ (5)

여기서 X_m , X_{ml} , X_μ 는 원 영상의 평균 명암도, X_m 보다 작은 명암도 영역의 평균 명암도, X_m 보다 큰 명암도 영역의 평균 명암도를 각각 나타낸다.

따라서 AMHE는 이상의 식 (4)와 식 (5)에 의해 조정된 히스토그램을 이용하여 기존의 THE와 동일한 과정으로 수행된다. 즉, 식 (6)과 같이 조정된 히스토그램의 누적분포함수 $c_{AMH}[k]$ 을 계산하고, 정규화한 후 평활화를 위한 변환함수 $f_{AMH}[k]$ 를 계산하여 영상의 명암도를 사상하는 과정으로 이루어진다.

$$c_{AMH}[k] = \sum_{i=0}^k p_{AMH}[i], f_{AMH}[k] = \frac{c_{AMH}[k]}{c_{AMH}[L-1]} \cdot (L-1)$$

for $k=0,1, \dots, L-1$ (6)

결국 AMHE는 원 영상의 히스토그램의 발생빈도수를 사전에 조정하여 이를 기반으로 기존 평활화 과정을 수행한다. 이렇게 하면 THE에서의 과도하게 변하는 명암도의 발생빈도수를 조절하여 밝기를 제어할 수 있으며, 비선형 변환함수를 이용함으로써 비슷한 명암도가 집중된 특정영역의 세밀한 정보까지 식별가능하게 된다.

3. 제안된 영상의 화질개선

THE는 평활화 과정이 간단하여 지금까지는 널리 이용되고 있으나 대상영상에 따라서는 변환영상의 밝기가 과도하게 변하여 화질이 오히려 떨어지는 제약이 있다. 이를 극복하기 위해 제안된 AMHE는 원 영상의 특정 영역의 세밀한 부분까지도 식별할 수 있으나 히스토그램 발생빈도수의 재조정을 위한 계산부하와 화질개선 제어계수의 최적설정이 제약으로 대두된다. 본 장에서는 다양한 히스토그램 분포를 가지는 영상에서도 우수한 화질개선 성능을 가지면서 계산 부하와 계수의 최적설정과 같은 제약을 해결할 수 있는 유연한 로지스틱 변환함수에 기반을 둔 히스토그램 평활화 (flexibly modified logistic histogram equalization : FMLHE) 기법을 새로이 제안한다.

인간 뉴런(neuron)의 전달함수, 확률통계, 수리심리학, 수리경제학 등의 분야에 널리 이용되고 있는 로지스틱 함수는 가장 일반적인 s-자형 곡선이다. 이 함수는 초기단계에서 기하급수적으로 증가하며, 포화단계에서는 증가가 둔화되고, 완성단계에서 증가가 멈춘다. 특히 성장을 모델화한 집합 w 에 대한 로지스틱 함수의 일반적인 형식은 다음의 식 (7)과 같다[11,12].

$$w = w_{max} / [1 + ve^{-k(t-t_m)}]^{(1/v)} \quad (7)$$

여기서 w_{max} , k , t , t_m , v 는 각각 집합 w 의 최대값, 성장함수의 곡률조정 계수, 변수, 성장률이 최대일 때의 변수, 곡선의 편향조정 계수이다. 식 (7)은 지수함수의 성장특성을 가지나 집합 w 값의 성장상한이 있으며, 비대칭의 성장함수를 가지는 로지스틱 함수이다[11]. 특히 식 (7)에서 $v=1$ 이면 대칭 성장함수를 가지는 로지스틱 함수이다. 실제 로지스틱 함수는 식물의 성장과 씨앗의 발아분야를 비롯하여 제한된 자원을 가진 환경 하에서의 인구증가, 총 판매량이 제한된 곳에서의 상품판매, 투자에 대한 환자의 반응 등의 모델링에 적용되고 있다[11,12]. 하지만 식 (7)이 대칭 및 비대칭 함수로 이용하기 위해서는 곡률설정 계수 k 만이 나 또는 편향조정 계수 v 를 포함한 두 계수 각각의 최적값을 경험적으로 설정하는 것과 지수함수 계산에 의한 부하가 증가하는 제약이 있다.

결국 이상의 제약을 해결하기 위해서는 새로운 성장함수가 정의되어야 한다. 이를 위해 종단에서는 영(zero)값을 가지며, 단봉 중 모양 곡선을 가지는 새로운 성장함수 g 를 정의하였다[11]. 즉, 정의된 성장함수 g 는 2개의 고정된 종단점을 가지는 유연한 비대칭 단봉곡선의 확률밀도함수이다. 이러한 성장함수 g 를 모델화한 로지스틱 함수 w 에 대한 형식은 다음의 식 (8)과 같이 정의된다.

$$w = w_{max} \left(1 + \frac{t_e - t}{denom} \right) \left(\frac{t}{t_e} \right)^{\frac{t_e}{denom}}, \quad \text{where } denom = t_e - e_m \quad (8)$$

여기서 t_e , c_m , t_m 은 각각 변수 t 의 종료 종단점, 성장함수의 최대성장률, 최대성장률일 때의 변수이다. 특히 식 (8)은 2개의 고정된 종단점 중 하나인 시작 종단점을 영으로 가정한 것이다. 또한 w_{max} 는 집합 w 의 최대값으로 이는 변수 t 가 종료 종단점 t_e 에 도달될 때 값이다. 다음의 그림 3은 식 (8)의 로지스틱 함수 w 와 성장함수 g 와의 관계를 변수 t 에 대해서 도시한 것이다. 그림 3에서 보면 성장초기 단계인 $t=0$ 에서는 $w=0$ 이고, 성장종료 단계인 $t=t_e$ 에서는 $w=w_{max}$ 가 된다. 그러므로 변수 t 가 $0 \leq t \leq t_e$ 에서만 성장함수는 적용되며, $t < 0$ 이거나 $t > t_e$ 에서는 $w=0$ 이나 $w=w_{max}$ 의 값을 가진다. 또한 t_m 에 따라서는 여러 가지 비선형의 s-자형 로지스틱 함수를 가지는 유연성도 가진다.

따라서 식 (8)에서 정의된 집합 w 에 대한 로지스틱 함수를 영상의 히스토그램 평활화를 위한 변환함수로 이용한다. 즉 변수 t 를 영상의 명암도 X 로 로지스틱 함수 집합 w 를 변환함수 $f(X)$ 로 대체한다. 특히 그림 3에서 성장함수 g 의 최대값 c_m 은 영상의 히스토그램에서 명암도의 최대 발생빈도수 *highest*, 종료 종단점 t_e 는 최대 명암도 L , c_m 일 때의 변수 t_m 은 최대 발생빈도수를 가지는 명암도 *max_level*로 각각 대체한다. 또한 기존 THE와 AMHE 각각의 누적분포함수 $c(X)$ 와 $c_{AMH}[k]$ 는 초기값이 영이므로 변환함수 $f(X)$ 와 $f_{AMH}[k]$ 의 초기값도 영이고, 종료값은 각각 $L-1$ 을 가진다. 식 (8)의 로지스틱 함수에서 $t=0$ 일 때 초기값 $w_{min}=0$ 이고, $t=t_e$ 일 때 최종값 $w_{max}=n$ 의 전체 픽셀수로 설정하면 기존의 THE나 AMHE와 동일하게 된다.

하지만 실제 영상의 히스토그램에서 최대 발생빈도수를 가지는 명암도 t_m 과 최대 명암도인 종료 종단점 t_e 가 동일

할 경우, 즉 $t_m = t_e$ 이면 식 (8)에서 괄호 내 분수항과 지수 항의 분모 $denom = t_e - t_m = 0$ 이 되어 계산이 성립되지 않는다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 원 영상의 최대 발생빈도를 가지는 명암도가 평균 명암도와 최대 명암도 사이의 관계 및 최대 발생빈도를 가지는 명암도와 평균 명암도 사이 차의 절대값을 각각 이용하여 $denom$ 을 다음의 식 (9)와 같이 조정하였다.

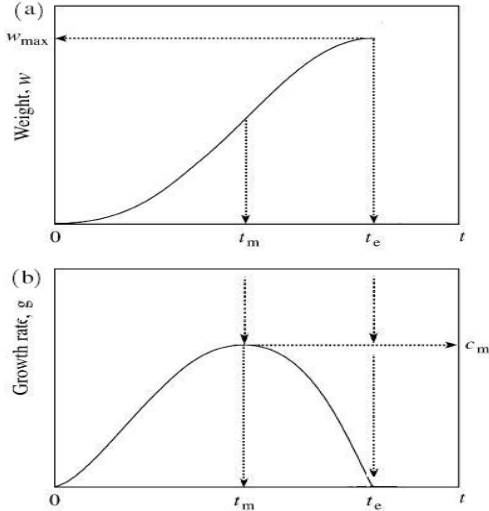


그림 3. 제안된 로지스틱 함수 $w(a)$ 와 성장함수 $g(b)$
 Fig. 3. Proposed logistic function $w(a)$ and growth function $g(b)$

여기서 $\lceil \cdot \rceil$ 는 바로 위의 소수점의 바로 위 정수를 나타내는 기호이다. 이는 원 영상에서 최대 발생빈도를 가지는 명암도와 최대 명암도의 근접정도에 따라 로지스틱 함수의 기울기를 조정하여 비선형의 변환특성을 잘 반영시키기 위함이다. 또한 최대 발생빈도를 가지는 명암도와 평균 명암도 사이 차의 절대값에 따라 로지스틱 함수에 의해 변환된 결과영상의 명암도 구별을 조정하기 위함이다.

결국 식 (8)과 식 (9)에 의해 제안된 로지스틱 함수를 이용한 히스토그램 평활화 FMLHE는 전장에서 서술한 것처럼 비선형 변환함수에 의한 평활화로 명암도 발생빈도수의 크기에 따라 명암도의 변화정도를 서로 다르게 사상시킬 수 있다. 이는 FMLHE도 AMHE에서처럼 유사한 명암도를 가지는 영역의 경계선과 같은 부분도 나타낼 수 있음을 나타낸다. 또한 식 (7)과 같은 일반적인 로지스틱 함수의 구현에서 계수들의 최적값을 경험적으로 설정하여야 하는 제약도 해결할 수 있으며, 지수함수의 계산에 따른 부하도 줄일 수 있다. 특히 식 (8)의 로지스틱 함수를 직접 변환함수로 이용함으로써 THE나 AMHE에서 누적분포함수를 이용하여 변환함수를 계산하는 부담을 줄일 수 있으며, AMHE에서 사전에 히스토그램을 재조정하기 위한 복잡한 과정도 없앨 수 있어 빠른 평활화가 가능하다.

$$denom = \begin{cases} \{L + \max_level, & \text{if } ((mean < \max_level) \text{ and } (dif_level > (L/2))) \\ \lceil ((L + \max_level)/2.0) \rceil, & \text{if } ((mean < \max_level) \text{ and } (dif_level \leq (L/2))) \\ \{L - \max_level, & \text{if } ((mean \geq \max_level) \text{ and } (dif_level > (L/2))) \\ \lceil ((L - \max_level)/2.0) \rceil, & \text{if } ((mean \geq \max_level) \text{ and } (dif_level \leq (L/2))) \\ \text{where, } dif_level = \lceil (abs(\max_level - mean)) \rceil \end{cases} \quad (9)$$

4. 실험 및 결과분석

로지스틱 함수에 기반을 둔 제안된 FMLHE의 성능을 평가하기 위해 다양한 크기의 해상도와 히스토그램 분포를 가지는 영상을 대상으로 실험하였다. 이는 영상의 화질개선은 개선정도를 나타내기 위한 정량적인 척도가 없으며 주로 주관적인 판단에 근거하기 때문이다[4-9]. 실험에 이용된 영상들은 인터넷을 통해 획득된 영상[13]뿐만 아니라 직접 디지털 카메라로 촬영한 영상들로 모두 8비트의 회색(gray) 영상들이다. 또한 제안된 FMLHE의 실험결과를 THE 및 AMHE의 실험결과들과 각각 비교·검토하였다. 실험은 펜티엄IV-3.0G 컴퓨터에서 Matlab 7.1로 구현하였다.

그림 4는 392*279의 enamel 원 영상을 대상으로 THE, AMHE, 그리고 제안된 FMLHE를 적용하여 평활화된 변환 영상, 히스토그램, 누적히스토그램을 각각 나타낸 것이다. 여기서 먼저 그림 4(a) 원 영상의 경우, 0에서 255까지 전 명암도 구간에 걸쳐 히스토그램이 분포하며, 최대 발생빈도수 $highest = 52662$ 이고 이때 명암도 $\max_level = 227$, 평균 명암도 $mean = 186.7$, 명암도의 평균 발생빈도수 $mid = 26331$ 이다. 원 영상의 히스토그램 그림 4(e)를 기반으로 하는 누적히스토그램은 그림 4(i)와 같다. 또한 그림 4(i)의 원 영상의 누적히스토그램을 변환함수로 하는 THE를 수행한 후, 결과영상과 히스토그램 및 누적히스토그램은 각각 그림 4(b)와 그림 4(f) 및 그림 4(j)와 같다. 그림 4(b)를 보면, 평활화 후 결과영상의 화질이 오히려 떨어졌음을 알 수 있다. 이는 그림 4(e)에서 보는 것처럼 원 영상에서 특정한 명암도들의 발생빈도가 매우 높기 때문이다. 하지만 그림 4(f)와 4(j)를 보면 각각 변환된 영상의 명암도는 더욱 넓게 분포하며, 누적히스토그램에 의한 변환함수는 선형특성을 가져 명암도 발생빈도수의 크기에 따른 명암도의 변화정도는 항상 일정하게 제공됨을 알 수 있다. 한편 그림 4(c), 4(g), 4(k)는 AMHE에 의한 결과영상, 히스토그램, 누적히스토그램을 각각 나타낸 것이다. 하지만 그림 4(c)의 경우 그림 4(b)의 경우처럼 원 영상보다 화질이 약간 떨어짐을 알 수 있다. 이는 AMHE에서 화질개선 제어 계수 α 의 값이 최적으로 설정되지 않았기 때문이다. 또한 그림 4(g)와 4(k)를 보면 각각 원 영상의 히스토그램과 누적히스토그램인 그림 4(e)와 4(i)와 유사하나 히스토그램의 분포가 약간 좌측으로 이동되었으며, 누적히스토그램은 좀 더 넓은 분포의 비선형임을 알 수 있다. 이는 AMHE의 결과영상의 밝기가 약간 어두워짐과 동시에 화질의 개선이 있음을 나타낸다. 한편 그림 4(d), 4(h), 4(l)은 제안된 FMLHE의 결과 영상, 히스토그램, 누적히스토그램을 각각 나타낸 것이다. 그림 4(d)의 경우 다른 평활화 기법들에 비해 화질이 개선되었음을 알 수 있다. 특히 결과영상의 히스토그램을 보면 명암도의 분포가 우측으로 치우쳐 원 영상에 비해 밝은 화질을 보이며, 누적히스토그램은 AMHE에서처럼 비선형의 분포를 가짐을 알 수 있다. 한편 원 영상, THE, AMHE, FMLHE에 의해 변환된 결과영상의 평균 명암도는 각각

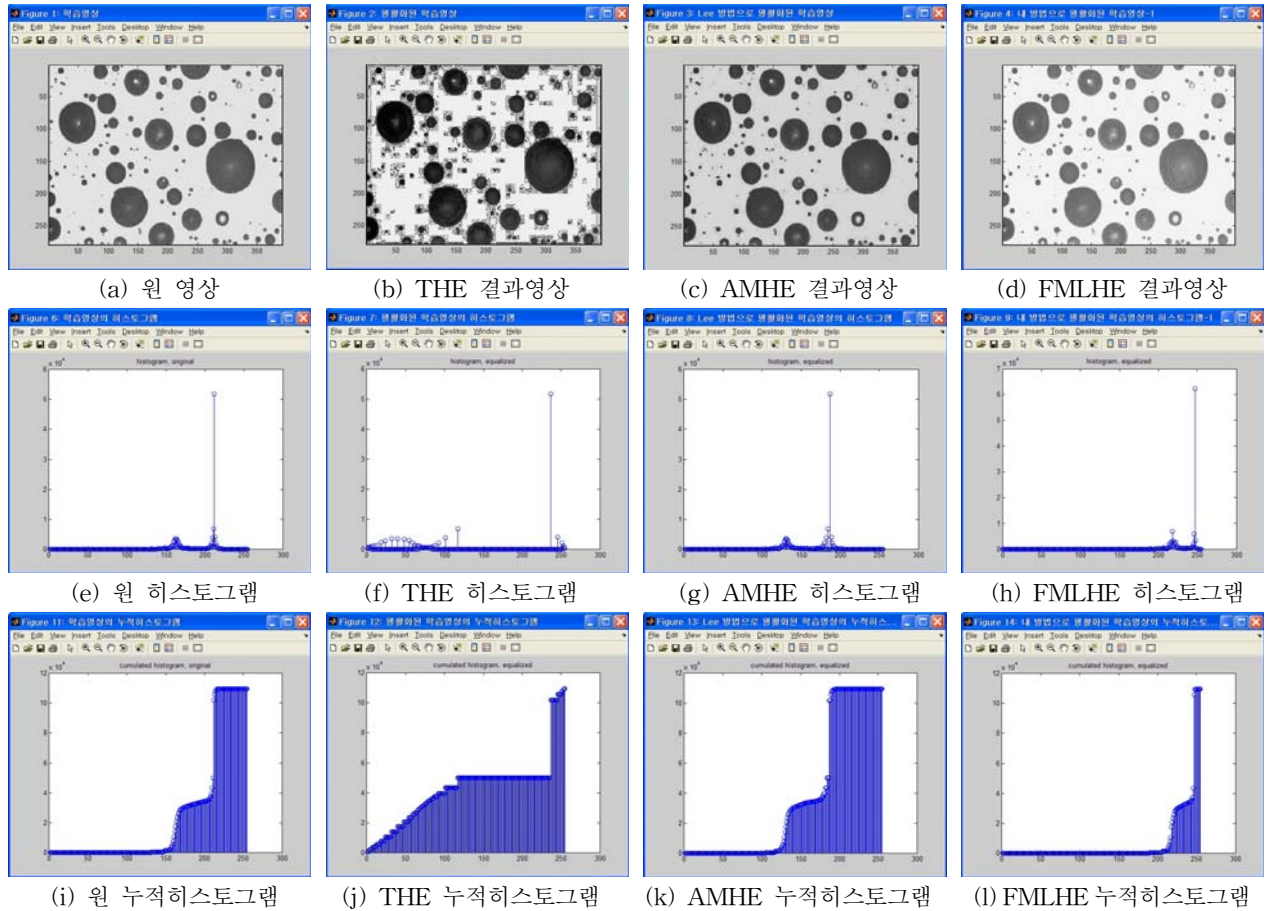


그림 4. enamel 영상의 히스토그램 평활화 결과
 Fig. 4. Histogram equalization results of enamel image

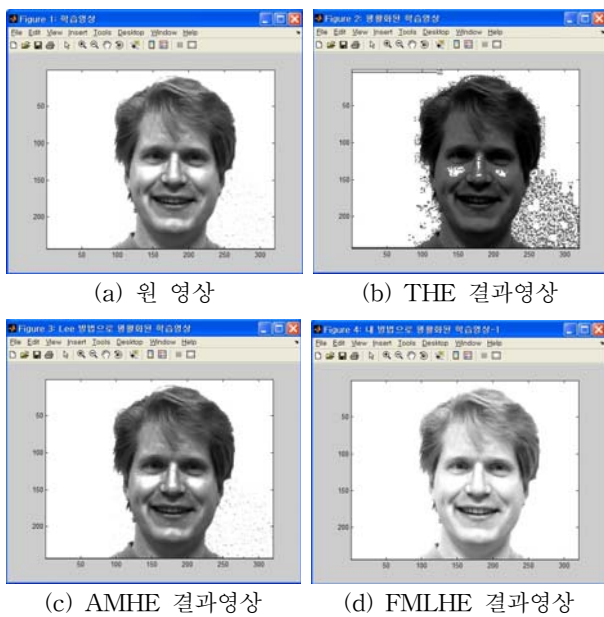
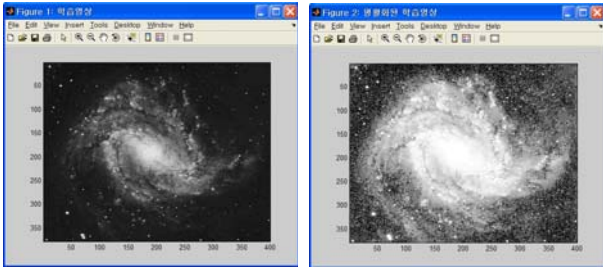


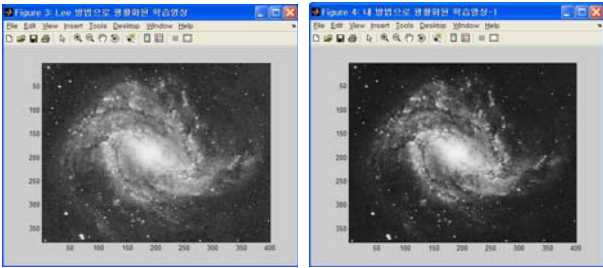
그림 5. 320*243 픽셀의 얼굴영상
 Fig. 5. Face images of 320*243 pixels

186.7, 172.9, 178.8, 197.3의 값을 가진다. 원 영상을 기준으로 절대 평균명암도 오차(Absolute mean intensity error : AMIE)를 각각 계산하면 13.8, 7.9, 10.6으로 AMHE가 가장 작은 값을 가져 원 영상의 밝기를 가장 잘 보존하며, 다음으로 제안된 FMLHE, THE 순이다. 하지만 그림 4(c)와 그림 4(d)를 비교하면, AMHE이 FMLHE보다 오히려 화질이 떨어짐을 알 수 있다. 이는 인간시각 측면에서 원 영상의 밝기가 최대 보존된다고 하여 반드시 좋은 화질의 영상이라고 볼 수 없다는 것이다. 즉, 인간시각이 판단하는 명암도는 단순히 절대적인 명암도인 밝기의 세기에 의존하지 않는다는 Weber의 법칙에 의한 것이다[9]. 따라서 enamel 영상을 대상으로 한 실험에서 제안된 FMLHE는 THE나 AMHE보다 개선된 화질을 얻을 수 있어 우수한 히스토그램 평활화 속성이 있음을 알 수 있다.

한편 그림 5에서 그림 10까지는 화질개선의 정도에 대한 정량적 척도 부재에 따라 6개의 해상도를 가지는 회색색 영상들을 대상으로 실험한 결과영상들이며, 그림 11은 대상영상들의 히스토그램을 각각 도시한 것이다. 그림 5는 320*243 픽셀의 얼굴영상, 그림 6은 400*378 픽셀의 우주영상, 그림 7은 512*512 픽셀의 Lena 영상, 그림 8은 640*480 픽셀의 도시영상, 그림 9와 10은 각각 800*600과 3072*2304 픽셀의 풍경영상-1,2를 대상으로 THE, AMHE, FMLHE의 평활화 기법을 적용했을 때 결과영상들이다. 먼



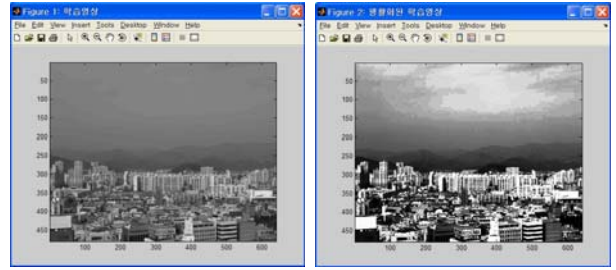
(a) 원 영상 (b) THE 결과영상



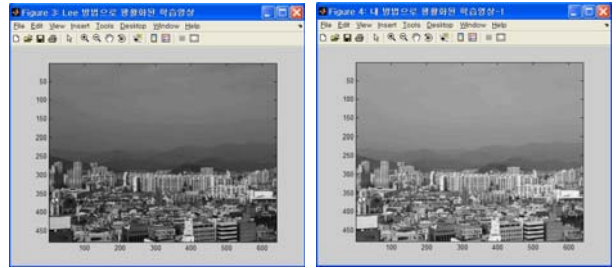
(c) AMHE 결과영상 (d) FMLHE 결과영상

그림 6. 400*378 픽셀의 우주영상

Fig. 6. Cosmic images of 4000*378 pixels



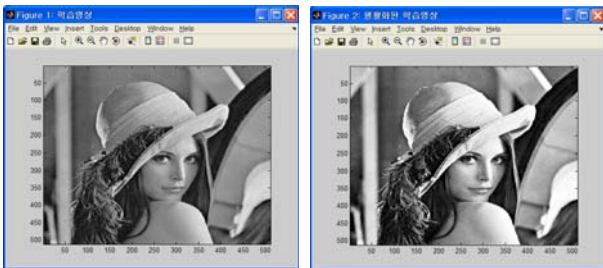
(a) 원 영상 (b) THE 결과영상



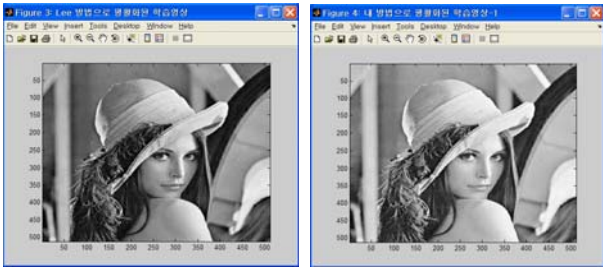
(c) AMHE 결과영상 (d) FMLHE 결과영상

그림 8. 640*480 픽셀의 도시영상

Fig. 8. City images of 640*480 pixels



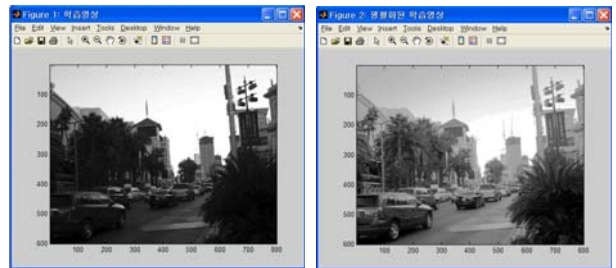
(a) 원 영상 (b) THE 결과영상



(c) AMHE 결과영상 (d) FMLHE 결과영상

그림 7. 512*512 픽셀의 Lena 영상

Fig. 7. Lena images of 512*512 pixels



(a) 원 영상 (b) THE 결과영상



(c) AMHE 결과영상 (d) FMLHE 결과영상

그림 9. 800*600 픽셀의 풍경영상-1

Fig. 9. Scene images-1 of 800*600 pixels

저 그림 5(b)의 THE에 의한 결과영상은 그림 5(a)의 원 영상보다 화질이 떨어진다. 이 역시 그림 4의 결과에서처럼 원 영상에서 특정한 명암도의 발생빈도수가 매우 높기 때문이다. 그러나 그림 5(c)와 (d)의 AMHE와 FMLHE에서는 결과영상의 화질이 개선되었다. 또한 그림 5의 평균 명암도를 살펴보면, 원 영상은 192.3, THE 결과영상은 174.6, AMHE 결과영상은 190.3, FMLHE 결과영상은 204.7의 값을 각각 가진다. 이는 THE와 AMHE 결과영상들은 원 영상보다 어둡게 변화했으며, FMLHE 결과영상은 밝게 변화했음을 알 수 있다. 특히 THE와 AMHE 결과영상들에서는 원 영상의 배경영역에 존재하는 잡음이 강조되었고,

FMLHE 결과영상에서는 잡음이 제거되었음을 볼 수 있다. 이는 FMLHE의 평활화로 잡음이 존재하는 영상의 화질개선도 가능함을 보여준다. 한편 그림 6(b)에서 그림 10(b)까지의 THE에 의한 결과영상들을 살펴보면, 그림 9(b)와 10(b)를 제외한 모든 결과영상에서 원 영상보다 화질이 떨어졌음을 확인할 수 있다. 이는 그림 11을 통해 실험대상 영상들의 히스토그램에서 전 영역의 명암도를 가지며, 특정한 명암도의 발생빈도수가 매우 높기 때문으로 THE 고유의 속성이 반영되었기 때문이다. 하지만 그림 9(b)와 10(b)에서는 원 영상의 히스토그램에서 분포가 특정 명암도에서 상대적으로 덜 높아 평활화로 화질개선이 이루어졌다. 그러

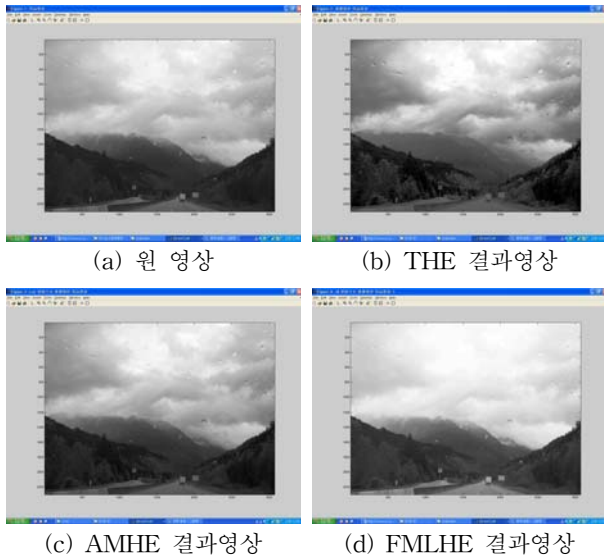


그림 10. 3072*2304 픽셀의 풍경영상-2
Fig. 10. Scene images-2 of 3072*2304 pixels

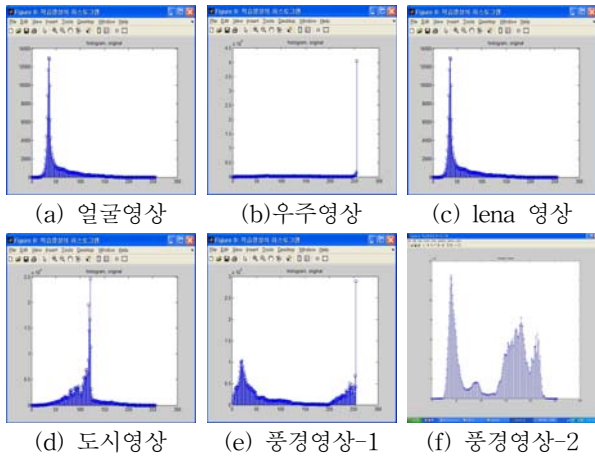


그림 11. 각 원 영상의 히스토그램
Fig. 11. Histograms of each original images

나 그림 9(b)의 하늘영역 부분의 화질은 오히려 저하됨을 알 수 있다. 또한 그림 6(c)에서 10(C)까지의 AMHE 결과 영상들을 보면, 그림 8(c)를 제외한 모두에서 원 영상이나 THE의 결과영상들보다 개선된 화질을 가진다. 이는 AMHE의 비선형 변환함수에 의한 평활화의 속성이 반영되었기 때문이다. 그러나 그림 8(c)는 원 영상보다 화질이 떨어진 결과영상으로 이는 AMHE에서 화질개선 제어계수 α 값이 최적으로 설정되지 않았기 때문이다. 따라서 AMHE의 경우 화질개선은 제어계수에 크게 의존함을 알 수 있다. 그림 6(d)에서 그림 10(d)까지의 제안된 FMLHE 결과영상들은 모두 원 영상, CHE, AMHE의 결과영상들보다 상대적으로 우수한 화질을 가진다. 이는 FMLHE가 비선형의 변환함수 이용과 동시에 화질개선을 위한 최적의 제어계수 설정과 같은 제약이 없기 때문이다. 한편 그림 6의 우주영상에서 원 영상, CHE, AMHE, FMLHE 결과영상들의 평균 명암도는 각각의 116.6, 159.3, 134.1, 122.9로 THE와 AMHE의 경우는 원 영상보다 지나치게 큰 값을 가져 영상

이 밝게 되어 화질이 떨어짐을 알 수 있다. 여기서 AMHE는 FMLHE, AMHE, THE 순으로 작은 값을 가져 제안된 FMLHE이 AMHE이나 THE보다 원 영상의 밝기정보를 더욱 잘 보존함을 알 수 있다. 따라서 FMLHE는 영상의 화질을 개선하는 우수한 히스토그램 평활화 기법임을 알 수 있다.

표 1은 THE, AMHE, FMLHE에 의한 영상의 히스토그램 평활화 시간을 각각 나타낸 것이다. 여기서 평활화 시간은 CPU 시간으로 평균처리시간이다. 표 1에서 6가지 해상도를 가지는 전체에 대한 평균처리시간을 보면 THE, FMLHE, AMHE의 순으로 빠른 처리속도를 가진다. 특히 THE와 AMHE를 비교하면 누적분포함수의 변환함수 계산시간은 동일하나, AMHE에서는 화질개선 제어계수의 계산과 이를 이용한 히스토그램 재조정에 필요한 시간이 추가되어 THE보다 더 오랜 시간이 걸렸다. 또한 THE와 FMAHE를 비교하면 누적분포함수와 로지스틱 함수에 의한 변환함수 계산에 소요되는 시간이 각각 요구되지만, FMLHE에서는 로지스틱 함수의 분모 *denom*의 계산이 추가되어 THE보다 더 오랜 처리시간을 가진다. AMHE와 FMLHE를 비교하면 각각 누적분포함수와 로지스틱 함수에 의한 변환함수 계산만으로는 AMHE가 빠르나, AMHE에서 화질개선 조정계수의 계산 및 이를 이용한 히스토그램 재조정의 추가적 요구로 전체적인 계산시간은 FMLHE이 더 빠른 처리속도를 가진다. 한편 초당 30프레임을 처리하는 멀티미디어 시스템에서 AMHE 방법을 사용할 때 실시간으로 동작 가능한 최대 해상도는 640×480 으로, 기존의 THE에서 실시간으로 처리할 수 있는 최대 해상도와 동일하다고 알려져 있다[9]. 따라서 표 1의 640×480 해상도의 결과를 보면, 제안된 FMLHE는 AMHE보다 약 1.02배 정도 빠른 처리속도를 가져 실시간 영상처리 기법으로도 충분히 이용될 수 있음을 알 수 있다.

표 1. 영상의 해상도 변화에 따른 평균처리시간
Table 1. Average processing time by changing resolution of images

해상도 평활화 기법	320 *243	400 *378	512 *512	640 *480	800 *600	3072 *2304
THE	0.31	0.55	0.94	1.09	1.70	24.42
AMHE	0.41	0.63	1.03	1.17	1.81	24.73
FMLHE	0.33	0.59	1.01	1.15	1.73	24.62

이상의 그림 4에서 10까지와 표 1의 실험결과들을 통해 제안된 로지스틱 함수의 변환함수 기반 FMLHE는 명암대비가 낮은 영상의 화질을 개선시킬 뿐만 아니라 평활화 처리속도도 빨라 능률적인 히스토그램 평활화 기법임을 확인할 수 있었다. 특히 THE와 AMHE와 같은 기존의 평활화 기법들보다 우수한 화질개선 성능이 있으며, 실시간 수행이 가능한 처리속도도 있음을 확인하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 영상의 화질개선을 위해 로지스틱 함수에 기반을 둔 히스토그램 평활화 기법을 제안하였다. 여기서 히스토그램 평활화는 영상의 밝기를 조정함으로써 화질을 개선하는 간단하고 효과적인 공간영역 기반 처리기법이다. 또한 로지스틱 함수는 비선형의 변환함수로 영상의 히스토그램에서 명암도의 발생빈도에 따라 밝기개선 정도를 적응적으로 조정하기 위함이다. 특히 영상의 히스토그램에서 최대 발생빈도를 가지는 명암도와 최대 명암도 및 전체 픽셀수만을 이용한 비대칭성의 유연한 s-자형 로지스틱 함수를 제안함으로써 기존 로지스틱 함수에서의 지수함수 계산과 최적의 계수 값을 경험적으로 사전에 설정해야하는 제약을 해결하였다.

제안된 기법을 320*243부터 3072*2304 픽셀을 가지는 다양한 해상도와 히스토그램 분포를 가지는 8비트 회색색 영상을 대상으로 실험하였다. 실험결과, 기존의 히스토그램 누적분포함수에 기반을 둔 평활화와 히스토그램의 적응조정을 이용한 평활화에 비해 우수한 화질개선 성능과 빠른 처리속도가 있음을 확인하였다. 또한 제안된 기법은 멀티미디어 시스템에서 실시간 평활화 기법으로도 충분히 이용될 수 있다.

향후 제안된 방법을 좀 더 다양한 속성의 영상 및 컬러영상을 대상으로 한 연구와 의료영상 등을 비롯한 일반적인 화질개선 기법으로의 적용에 대한 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

[1] 최형일, 이근수, 이양원 공역, *영상처리 이론과 실제*, 홍릉과학출판사, 1999.
 [2] 하영호, 남재열, 이용주, 이철희 공역, *디지털 영상처리*, 도서출판그린, 2003.
 [3] 조용현, *디지털 영상처리 실무*, 도서인터비전, 2005.
 [4] Y. T. Kim, "Contrast Enhancement using Brightness Preserving Bi-Histogram Equalization," *IEEE Trans. on Consumer Electronics*, Vol. 43, No. 1, pp. 1-8, Feb. 1997.
 [5] S. Chen and A. R. Ramli, "Contrast Enhancement using Recursive Mean-Separate Histogram Equalization for Scalable Brightness Preservation," *IEEE Trans. on Consumer Electronics*, Vol. 49, No. 4, pp. 1301-1309, Nov. 2003.
 [6] S. Chen and A. R. Ramli, "Minimum Mean Brightness Error Bi-Histogram Equalization in Contrast Enhancement," *IEEE Trans. on Consumer Electronics*, Vol. 49, No. 4, pp. 1310-1319, Nov. 2003.
 [7] S. M. Pizer, E. P. Amburn, J. D. Austin, R. Cromartie, A. Geselowitz, T. Greer, B. H. Romeny, J. B. Zimmerman, and K. Zuiderveld, "Adaptive Histogram Equalization and Its Variations," *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, Vol. 39, No. 3, pp. 355-368, Sept. 1987.

[8] S. J. Yang, J. H. Oh, and Y. J. Park, "Contrast Enhancement Using Histogram Equalization with Bin Underflow and Bin Overflow," *International Conference on Image Processing*, pp. 881-884, Sept. 2003.
 [9] 이종명, 김형준, 이진언, 오상근, 김희율, "히스토그램의 적응적 변형을 이용한 화질개선 방법," 한국정보과학회 제 18회 영상처리 및 이해에 관한 워크샵 발표논문집, pp. 45-50, 2006.
 [10] T. Kim and J. Paik, "Adaptive Contrast Enhancement Using Gain-Controllable Clipped Histogram Equalization," *IEEE Trans. on Consumer Electronics*, Vol. 54, No. 4, pp. 1803-1810, Nov. 2008
 [11] X. Yin, J. Goudriaan, E. A. Latanga, J. Vos, and H. J. Spiertz, "A Flexible Sigmoid Function of Determinate Growth," *Annals of Botany*, Vol. 91, pp. 361 - 371, 2003.
 [12] C. P. D. Birch, "A New Generalized Logistic Sigmoid Growth Equation Compared with the Richard Growth Equation," *Annals of Botany*, Vol. 83, pp. 713 - 723, 1999.
 [13] "Yale Face Databases," <http://cvc.yale.edu/projects/yalefaces/yalefaces.html>

저 자 소 개



조용현(Yong-Hyun Cho)

1979년 : 경북대학교 전자공학과(공학사)

1981년 : 경북대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)

1993년 : 경북대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)

1983년~1984년 : 삼성전자(주)

1984년~1987년 : 한국전자통신연구원

1987년~1997년 : 영남이공대학 전자과 교수

1997년~현재 : 대구가톨릭대학교 컴퓨터정보통신공학부 교수

관심분야 : 신경회로망, 영상신호처리 및 인식, 상황인식, 전자교환기 등

Phone : +82-53-850-2747

Fax : +82-53-850-2740

E-mail : yhcho@cu.ac.kr