

영상 화질 측정을 위한 픽셀 강도 영역의 새로운 광적응 효과 모델: 이론 및 적용

배성호, 김문철
한국과학기술원 전기 및 전자 공학과
s.h.bae@kaist.ac.kr, mkim@ee.kaist.ac.kr

A Novel Luminance Adaptation Effect Model in Pixel Intensity Domain for Image Quality Assessment: Theory and Application

Sung-Ho Bae, Munchurl Kim
Korea Advanced Institute of Science and Technology Dep. of Electrical Engineering

요약

광적응(Luminance Adaptation; LA) 효과는 영상의 배경 밝기에 따른 왜곡에 대한 시각 인지 민감도가 달라지는 특성을 의미한다. 기존 영상 화질 측정(Image Quality Assessment; IQA) 방법들은 베버의 법칙(Weber's law) 모델을 이용하여 LA 효과를 IQA 방법에 반영해왔다. 그러나, 이러한 IQA 방법들에 있어서 베버의 법칙 기반 LA 효과 모델은 다음 두 가지 이유로 부정확하게 동작한다: (i) 전통적인 베버의 법칙 모델은 실제 광도(luminance)에 대한 인지 민감도 응답값을 정확히 반영할 수 없다는 것이 밝혀졌다, (ii) 대부분 IQA 방법들은 픽셀 강도 영역에서 계산되지만, 베버의 법칙과 같은 LA 효과 모델들은 광도 영역에서 개발되었다. 따라서 광도와 픽셀 강도간 비선형 관계로 인해 IQA 방법에 반영된 베버의 법칙 기반 LA 효과 모델들은 부정확하게 동작한다. 이 문제를 해결하기 위해, 본 논문에서 처음으로 픽셀 강도 영역에서의 LA 모델을 이론적으로 유도한다. 본 논문에서 제안하는 픽셀 강도 영역에서의 LA 효과 모델은 감마 교정 함수(Gamma correction function)와 광도 영역에서의 LA 효과 모델인 제곱-법칙(power-law) 모델을 기반으로 하는 테일러 급수 확장 근사화를 통해 유도된다. 제안하는 픽셀 강도 영역 LA 효과 모델의 효과를 검증하기 위해, 제안하는 LA 효과 모델을 PSNR 에 도입하여 광범위한 실험을 수행한다. 실험 결과, 제안하는 LA 효과 모델 기반 PSNR 은 PSNR 및 베버의 법칙 기반 PSNR 대비 괄목할 만한 주관적 화질 예측 성능 향상을 보였다.

1. 서론

영상의 화질을 객관적으로 측정하는 방법은 영상처리 및 컴퓨터 비전 분야에서 매우 중요하게 사용된다 [1]. 예를 들어, 영상 복원 문제에 있어서 인지적으로 좋은 화질을 가지는 영상을 복원하기 위해, 객관적 화질 측정(또는 왜곡 측정) 방법은 영상의 화질을 최대화 하는 관점에서 최적화를 수행하는 방법에 적용되거나, 계산 복잡도를 줄이기 위해 인지적으로 화질에 많은 영향을 주는 영상 국부 지역에 대한 선택적인 계산처리를 위한 인지 기반 영상처리 방법에 적용될 수 있다[1]–[3]. 최근 SSIM(Structural SIMilarity) 인덱스의 개발을 위시하여, 영상 왜곡에 대한 주관적 인지 화질과 상당히 높은 일관성을 가지는 객관적 영상 화질 측정(Image Quality Assessment; IQA) 방법들이 개발되었다[4]–[8]. 이 중 많은 방법들이 배경 밝기에 대한 인지 왜곡 민감도 변화 특성을 반영하기 위해 베버의 법칙(Weber's law)을 따르는 광적응(Luminance Adaptation; LA) 효과 모델을 도입하였다[5]–[8]. 베버의 법칙은, 사람 시각의 신호 왜곡 인지 민감도가 영상의 배경 광도(background luminance)에

따라 달라지는 효과를 의미하며 [9]–[12], 일반적으로 아래와 같이 모델링 된다.

$$\delta = \Delta L / L_x \quad (1)$$

여기서 δ 는 상수이며, $\Delta L = |L_y - L_x|$ 는 영상의 원본 신호의 광도(L_x)와 왜곡 신호의 광도(L_y)에 대한 인간 시각 시스템(Human Visual System; HVS)의 최소 인지 가능 광도 차이의 크기를 의미한다. 식 (1)에서 ΔL 는 최소가치차(JND: Just Noticeable Difference) 임계치라고도 한다[9]–[12]. 식 (1)은 배경 신호의 광도가 커질수록 인지 가능한 최소 왜곡 신호의 광도값도 증가한다는 것을 의미한다.

그러나, 우리는 기존 대부분 IQA 방법에서 도입된 LA 효과 모델들이 부정확하게 동작한다는 것을 발견했다. 그 이유는 다음과 같다:

(i) 최근 정신물리학 연구 결과는 (1)의 베버의 법칙 모델이 실제 실험값에 정교하게 맞추어 지지 않는다는 사실을 밝혔다 [13]. 대신, Frese 는 제곱 법칙(power law) 모델을 제안했고, 제곱 법칙 모델이 베버의 법칙 모델보다 실험값에 훨씬 잘 맞는다는 것을 검증했다[13].

(ii) 기존 대부분 IQA 방법들은 픽셀 강도 영역에서 수행되도록 설계되었다. 그러나 베버의 법칙(또는 제곱 법칙) 모델들은 모두 광도 영역에서 제안된 모델이다. 감마 교정 함수(Gamma correction function)로 인해 광도값과 픽셀 강도 값은 비선형적으로 맵핑되기 때문에 광도 영역에서 개발된 기존 LA 효과 모델들은 픽셀 강도 영역에서는 동일하게 동작하지 않는다[10].

따라서 기존 베버의 법칙 모델을 이용한 많은 IQA 방법들은 LA 효과를 정확하게 반영하지 못한다.

2. 제안하는 픽셀 강도 영역의 LA 효과 모델

본 논문에서는 Frese 의 제곱 법칙 모델[13]과 감마 교정 함수를 이용해서 근사화된 픽셀 강도 영역의 LA 효과 모델을 유도한다. 제곱 법칙 모델은 아래와 같이 표현된다.

$$\Delta L / L_x = (\eta \cdot L_{Ref}^\zeta) \cdot L_x^{-\zeta} \quad (2)$$

여기서 η, ζ, L_{Ref} 는 모두 상수이다. 감마 교정 함수는 아래와 같다.

$$L_x = \alpha + \beta \cdot \mu_x^\gamma \quad (3)$$

여기서 α, β, γ 는 모델 파라미터이며 μ_x 는 국부 영상 신호 \mathbf{x} 에 대한 L_x 와 대응되는 평균 픽셀 강도값이다. 본 논문에서, 픽셀 강도 영역의 LA 효과 모델을 유도하기 위해 식 (2)와 (3)을 사용한다. 식 (3)에서 L_x 와 μ_x 를 $L_x + \Delta L$ 와 $\mu_x + \Delta \mu_x$ 으로 대체한 후, 이에 1 차 테일러 급수 확장(Taylor series expansion)을 적용하여 아래의 식을 유도한다.

$$L_x + \Delta L = \alpha + \beta \cdot \mu_x^\gamma (1 + \Delta \mu / \mu_x)^\gamma \quad (4)$$

(2)의 ΔL 와 (3)의 L_x 를 (4)에 치환한 다음 $\Delta \mu$ 에 대해 정리한 결과는 아래와 같다.

$$JND(\mu_x) = \Delta \mu = a_1 \cdot \mu_x^{a_2} + a_3 \cdot \mu_x + a_4 \quad (5)$$

여기서 $a = \{ a_i | i=1, \dots, 4 \}$ 는 모델 파라미터의 세트이다. 우리는 유도한 픽셀 강도 영역의 LA 효과에 대한 JND 모델 (5)의 모델 파라미터를 결정하기 위해 Chou 의 실험 결과를 사용하였다[12]. 최소자승오차 해법 방식으로 찾은 (5)의 모델 파라미터는 $a_1 = -2.655, a_2 = 0.9259, a_3 = 1.709$ and $a_4 = 21.73$ 이다. 그림 1 은 제안한 LA 효과에 대한 JND 모델 (5)가 픽셀 강도 영역에서 측정된 실제 JND 값에 대해 매우 높은 일관성을 가지며 맞추어지는 것을 보인다.

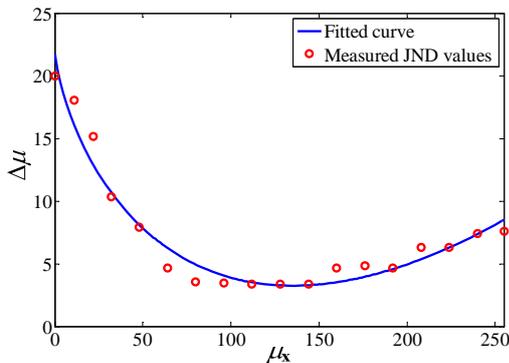


그림 1. 측정된 LA 효과에 대한 JND 값[14]과 이에 맞추어진 제안하는 (5)의 픽셀 강도 영역의 LA 효과에 대한 JND 모델 곡선.

3. 실험 결과

제안하는 픽셀 강도 영역의 LA 효과 모델(또는 LA 효과에 대한 JND 모델)의 성능을 검증하기 위해, 제안하는 LA 효과 모델을 PSNR 에 결합하였다. 결합 방법은 PSNR 을 계산할 때 각 픽셀의 배경 평균 밝기값에 따라, 더욱 민감한 배경 밝기 값을 가지는 픽셀에 대해 더욱 높은 가중치를 주는 방식으로 결합하였다. 여기서 가중치는 (9)로부터 계산한 JND 값의 역수와 비례하는 값을 사용하였다. 또한 성능 비교를 위해 PSNR 뿐만 아니라 (1)의 베버의 법칙 모델을 사용한 PSNR 도 실험에 도입하였고, 여기서 마찬가지로 W-PSNR 을 계산하기 위해 각 픽셀의 배경 평균 밝기값에 따른 민감도를 (1)로부터 계산해서 더욱 민감한 배경 밝기 값을 가지는 픽셀에 대해 더욱 높은 가중치를 주는 방식으로 결합하였다. 실험에서 사용한 TID2008 데이터베이스는 25 개의 참조 영상에 대해 17 종류의 다른 왜곡특성을 가지는 총 1700 개의 왜곡된 영상을 포함하고 있다 [8]. 성능 검증을 위해, 본 논문에서는 4 개의 성능 지표를 도입하였다: Spearman Rank-Order Correlation coefficient (SROC), Kendall Rank-Order Correlation coefficients (KROC), Pearson Linear Correlation coefficient (PLCC), Root Mean Squared Error (RMSE). 우리는 계산된 IQA 방법과 실제 측정된 주관적 화질 점수(MOS: mean opinion score)를 매핑시키기 위해 로지스틱 회귀법을 사용하였다 [14]. 표 1 은 베버의 법칙모델에 기반한 PSNR(W-PSNR), PSNR, 제안하는 픽셀 강도의 LA 효과 모델이 결합된 PSNR(LA-PSNR)에 대한 TID2008 에서의 전체 성능을 보인다.

표 1. TID2008 상에서의 W-PSNR, PSNR 과 제안하는 LA-PSNR 간 성능 비교.

Index	SROC	KROC	PLCC	RMSE
W-PSNR(A)	0.4911	0.3449	0.4419	1.2038
PSNR(B)	0.5245	0.3696	0.5309	1.1392
LA-PSNR(C)	0.5509	0.3904	0.5417	1.1280
C-A	+0.0598	+0.0455	+0.0998	-0.0758
C-B	+0.0264	+0.0208	+0.0108	-0.0112

결과적으로, 제안하는 LA-PSNR 은 W-PSNR 과 PSNR 에 비해 SROC 관점에서 각각 6%, 2.6%의 성능 향상을 보였다. 이 결과는 픽셀 강도 영역에서 유도한 제안하는 LA 효과 모델이 기존 베버의 법칙 모델보다 LA 효과를 더욱 정교하게 반영한다는 것을 나타낸다.

5. 결론

본 논문에서는 최초로 기존 베버의 법칙 모델에 기반한 LA 효과 모델이 픽셀 강도 영역에서 부정확하게 동작하는 이유를 분석하고, 이 분석을 기반으로 새로운 픽셀 강도 기반 LA 효과 모델을 감마 교정 함수와 제곱-법칙 모델로부터 유도하였다. 유도한 픽셀 강도 기반 LA 효과 모델을 PSNR 에 결합하여 광범위한 실험을 수행하였다. 실험 결과, 제안하는 LA 효과 모델이 결합된 PSNR 이 기존 PSNR 및 베버의 법칙 모델 기반 PSNR 보다 더 높은 주관적 화질 점수 예측력을 보였다. 이 결과는 제안하는 LA 효과 모델이 픽셀 강도 영역에서 LA 효과를 매우 정교하게 반영한다는 것을 의미한다.

감사의 글

본 논문 연구는 연구재단 중견연구자사업 핵심연구(개인) 과제(과제번호: 2014R1A2A2A01006642)로 수행되었음.

참고문헌

- [1] Z. Wang and A. C. Bovik, "Mean squared error: Love it or leave it? A new look at signal fidelity measures," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 26, no. 1, pp. 98–117, Jan. 2009.
- [2] J.-S. Choi, S.-H. Bae and M. Kim, "A No-Reference Perceptual Blurriness Metric based Fast Super-Resolution of Still Pictures using Sparse Representation," *Proc. SPIE*, Feb. 2015.
- [3] J. Kim, S.-H. Bae, and M. Kim, "An HEVC-Compliant Perceptual Video Coding Scheme based on JND Models for Variable Block-sized Transform Kernels," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, in press, Jan. 2014.
- [4] Z. Wang, A.C. Bovik, H.R. Sheikh, and E.P. Simoncelli, "Image quality assessment: from error visibility to structural similarity," *IEEE Trans. on Image Process.*, vol. 13, pp. 600–612, Apr. 2004.
- [5] Z. Wang and Q. Li, "Information content weighting for perceptual image quality assessment," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 20, no. 5, pp. 1185–1198, May 2011.
- [6] Z. Wang, E. P. Simoncelli, and A. C. Bovik, "Multiscale structural similarity for image quality assessment," *Proc. 37th Asilomar Conf. Signals, Syst., Comput.*, Nov. 2003, pp. 1398–1402.
- [7] A. Liu, W. Lin, and M. Narwaria, "Image quality assessment based on gradient similarity," *IEEE Trans. on Image Process.*, vol. 21, no. 4, pp. 1500–1512, Apr. 2012.
- [8] N. Ponomarenko, V. Lukin, A. Zelensky, K. Egiazarian, M. Carli, and F. Battisti, "TID2008-A database for evaluation of full-reference visual quality assessment metrics," *Adv. Modern Radioelectron.*, vol. 10, pp. 30–45, 2009.
- [9] S.-H Bae and M. Kim, "A Novel DCT-based JND Model for Luminance Adaptation Effect in DCT Frequency," *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 20, no. 9, pp. 893–896, Sept. 2013.
- [10] Z. Wei and K. N. Ngan, "Spatio-temporal just noticeable distortion profile for grey scale image/video in DCT domain," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 19, no. 3, pp. 337–346, Mar. 2009
- [11] S.-H Bae and M. Kim, "A Novel Generalized DCT-based JND Profile Based on An Elaborate CM-JND Model for Variable Block-Sized Transforms in Monochrome Images," *IEEE Trans. on Image Process.*, vol. 23, no. 8, Aug. 2014.
- [12] C.-H. Chou, Y.-C. Li, "A perceptually tuned subband image coder based on the measure of just-noticeable distortion profile," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.* vol. 5, no. 6, pp. 467–476, Dec. 1995.
- [13] T. Frese, C. A. Bouman, and J. P. Allebach. "A methodology for designing image similarity metrics based on human visual system models" . *Proc. SPIE*, vol. 3016, pp. 472–483, 1997.
- [14] Final Report From the Video Quality Experts Group on the Validation of Objective Models of Video Quality Assessment VQEG [Online]. Available: <http://www.vqeg.org>, 2000.