

Robust Decoding of Barcode Signals Acquired under Nonuniform Illumination

李韓娥* · 金廷泰†
(Hana Lee · Jeongtae Kim)

Abstract – We present a novel joint barcode deblurring and nonuniform illumination compensation algorithm for barcode signals whose number of modules is known. The proposed algorithm is based on a penalized least squares method using a roughness penalty function for an illumination model and a double well penalty function for a barcode signal model. In simulations, the proposed method shows an improved performance compared with a conventional method without compensating nonuniform illumination effects. In addition, the proposed method converges quickly during optimization (within 15 iterations), thereby showing strong possibility for real time decoding of barcode signals.

Key Words : Barcode, Deblurring, Illumination, Module, Regularization

1. 서 론

1차원 바코드 영상은 어두운 값 혹은 밝은 값들 중의 하나만을 가지는 이진 영상 (bi-level image) 으로서 두 밝기 값들 중의 하나를 가지는 일정 길이의 모듈 (module) 들이 연속하여 구성되어 있다. 바코드에 저장되어 있는 정보는, 어두운 밝기 값들의 모듈들이 연속한 부분인 바 (bar) 와 밝은 값들이 연속한 부분인 스페이스 (space) 의 길이의 비율로 정보가 인코딩 (encoding) 되어 있다. 따라서 획득한 바코드 영상을 정확히 복호화 하기 위해서는 바와 스페이스의 길이를 정확히 추정하는 것이 필요하다.

이를 위하여 획득된 영상에서의 에지를 검출하고 그 간격을 추정하는 에지 기반 방법 [1], 획득된 영상에서 바코드 영역의 시작점과 끝점을 추정하고 바코드 영역 내부의 모듈들의 밝기 값들을 추정하는 모듈 기반 방법 [2] 등이 연구되어 왔다. 모듈 기반 방법은 바코드 신호의 처음과 끝을 바코드 모듈의 총 개수로 나누어, 각 개별 모듈의 크기를 추정하고 그 크기 값들이 일정 임계치 (threshold) 를 넘는 경우는 스페이스를 구성하는 모듈로 판단하고 그렇지 않은 경우는 바를 구성하는 모듈로 판단한다. 이 방법은 에지의 개수가 알려져 있어야 하는 에지 기반 방법에 비해서 보다 넓은 응용범위를 가지는 방법이다. 예를 들어 2차원 바코드 영상의 경우 에지 기반 방법은 적용하기가 곤란한 반면 모듈 기반 방법은 바코드 모듈의 개수를 먼저 추정한 다음 적용할 수 있다는 장점이 있다 [3].

바코드 스캐너를 사용하여 획득된 바코드 영상은 일반적

으로 영상 획득 장치 등에서 발생하는 PSF (Point Spread Function) 에 의해 원 영상이 블러링 (blurring) 되어 있어서 에지들의 위치가 정확한 위치에서 이동이 되어 있고, 모듈의 밝기 값들도 원래의 정확한 값에서 변화되어 있어서 정확한 복호가 어렵게 된다 [1-2]. 이러한 문제점을 해결하기 위해서, 선행 연구에서는 에지의 개수가 알려진 경우, 모듈의 개수가 알려진 경우들에 대하여 디블러링 (deblurring) 알고리즘을 설계하여 효과적인 복호가 가능하도록 하였다 [1-2].

선행 연구들에서 제안된 방법은 영상 획득시 조명이 균일한 경우에는 효과적이거나 조명이 불균일할 경우에는 그 성능이 저하되게 된다. 실제로 바코드 영상 획득시의 조명은 균일하지 않으므로 디블러링의 성능이 저하되게 되고, 복호시 오류가 발생하는 경우들이 존재하게 된다 [4]. 에지 검출을 기반으로 하는 방법에서는 블러링과 불균일 조명 효과를 동시에 보상하는 방법이 제안되어 효과적으로 바코드를 복호화 할 수 있으나 [4], 모듈 기반 방법의 경우에는 불균일 조명과 블러링이 존재하는 경우 효과적인 복호 알고리즘이 존재하지 않는다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 논문에서는 모듈 기반 방법에서의 효과적인 불균일 조명 보상과 디블러링 을 동시에 수행하는 알고리즘을 제안한다.

일반적으로 디블러링과 불균일 조명의 보상은 그 해가 유일하지 않은 ill-posed 역문제 (inverse problem) 이다 [4]. 따라서 해의 유일성을 보장하고 효과적인 최적화 알고리즘을 사용하기 위하여서는 정규화 (regularization) 과정을 통하여 해를 유일하게 정의할 수 있도록 하여야 한다 [5]. 정규화 방법으로는 발견하고자 하는 해의 속성에 기반한 벌칙 함수 (penalty function) 를 목적함수에 추가하는 방법이 널리 사용된다 [5]. 본 논문에서는 공간상에서의 조명의 변화가 급격하지 않다는 정보를 사용한 roughness 벌칙 함수와 바코드 신호 정보의 이진성 (binariness) 을 활용한 double-well 벌칙 함수 기반 정규화 기법을 제안한다. 목적

* 學生會員 : 梨花女子大學敎 電子工學科 博士課程
† 敎신저자, 正會員 : 梨花女子大學敎 電子工學科 助敎授 · 工博
E-mail : jtkim@ewha.ac.kr
接受日字 : 2008年 2月 24日
最終完了 : 2008年 3月 23日

함수를 최적화하는 알고리즘으로는 Gauss-Newton 알고리즘을 사용하고, 효과적인 초기치 추정기법을 제안하여 빠른 시간 안에 불균일 조명과 바코드 모듈 값들을 추정할 수 있도록 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서 제안하는 방법을 이론적으로 설명한다. 3장에서는 제안하는 방법을 사용한 실험 결과를 설명하고 추후 연구 방향에 관하여 토론하며 4장에서 결론을 맺는다.

2. 제안하는 방법

2.1. 모델링 및 목적함수 설계

이상적인 바코드 원 신호는 모듈의 개수가 M 인 경우, 시작점 t_b , 끝점 t_f 를 이용하여, 식 (1)과 같이 폭이 T 인 펄스 함수 $p_T(t)$ 들의 합으로 나타낼 수 있다 [2].

$$s(t; \underline{\alpha}, t_b, t_f) = \sum_{i=1}^M \alpha_i p_T(t - t_i) \tag{1}$$

$$= \sum_{i=1}^M \alpha_i p_T(t - \frac{M+i-1}{M} t_b - \frac{i-1}{M} t_f)$$

이때, $\underline{\alpha} = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_M]$ 는 각 모듈의 크기이고, $T = (t_f - t_b) / M$ 는 모듈의 폭, $t_i = t_b + (i-1)T$ 는 각 모듈의 시작위치를 나타낸다. 영상 획득 장치로 획득한 바코드 신호 $y(t)$ 는 바코드 원 신호가 표준편차 σ 를 가지는 가우시안 (Gaussian) 형태의 PSF $G(t; \sigma)$ 에 의해 블러링 되고 조명 $I(t)$ 하에서 획득된 후 잡음 $n(t)$ 가 더해져 있는 것으로, 식 (2)와 같이 모델링 될 수 있다.

$$y(t) = I(t) [G(t; \sigma) * s(t; \underline{\alpha}, t_b, t_f)] + n(t) \tag{2}$$

선행 연구에서는 $I(t)$ 가 공간상에서 균일하다는 가정 하에 EM (Expectation Maximization) 알고리즘을 사용하여 $y(t)$ 와 모델 $G(t; \sigma) * s(t; \underline{\alpha}, t_b, t_f)$ 의 통계적 거리를 최소화하는 인수 $[\alpha, t_b, t_f, \sigma]$ 를 추정함으로 디블러링을 수행하였다 [2]. 그러나, 이 방법은 영상에 불균일 조명효과가 존재하는 경우, 복호 성능이 떨어지게 된다는 문제점을 가지고 있다 [4]. 따라서, 본 논문에서는 불균일 조명효과 $I(t)$ 를 인수화하여 신호모델에 추가하여 불균일 조명효과를 보상하는 방법을 제안한다. 이를 위하여 본 논문에서는 불균일 조명을 식 (3)과 같이 B-spline 함수들을 사용하여 모델링한다 [6].

$$I(t; \underline{b}) = \sum_j^L b_j \beta^3(t - c_j) \tag{3}$$

이 때 $\beta^3(t)$ 는 3차 B-spline 함수이고, 각각의 B-spline 함수는 $c_j (j=1, \dots, L)$ 를 중심점으로 하여 $c_1 < c_2 < \dots < c_L$ 의 순서로 공간상에서 균일하게 배치되어 있다. 식 (3)에서 B-spline 함수의 계수 $\underline{b} = [b_1, b_2, \dots, b_L]$ 에 따라서 불균일 조명 곡선의 형태가 결정된다.

본 논문에서는 식 (2), (3)과 같이 인수화된 바코드 신호 모델을 사용하여, 관측된 신호 $y(t)$ 와 가장 유사한 신호 모델을 생성하는 인수 $\theta = [\alpha, t_b, t_f, \sigma, \underline{b}]$ 를 추정하여 디블러링과 불균일 조명 효과 보상을 동시에 수행한다. 유사성 최대화를 계량화 하는 방법으로는 널리 사용되는 L_2 norm 최소화, 즉 MSE (Mean Square Error) 최소화 방법을 사용한다. 실제 MSE 계산은 공간상에서의 균일한 샘플링 위치 $t_i, i=1, \dots, N$ 에서 샘플링된 관측신호와 신호모델을 사용하여 수행되므로, 본 논문에서 제안하는 인수 추정 기법은 식 (4)와 같이 정의된다.

$$\hat{\theta} = \arg \min_{\theta} \sum_{i=1}^N (y_i - I_i(\theta) x_i(\theta))^2 \tag{4}$$

여기서, $y_i = y(t_i), I_i(\theta) = I(t_i; \theta), x_i(\theta) = x(t_i; \theta)$ 이다.

식 (4)와 같은 비선형 최소자승 (nonlinear least squares) 문제는 그 해가 유일하지 않은 ill-posed 문제인 경우가 있다 [5]. Ill-posed 인 경우에는 해를 유일하게 정의할 수 없을 뿐만 아니라 Gauss-Newton 등의 효과적인 최적화 알고리즘을 사용하기 어렵다는 문제점들을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 발견하고자 하는 해에 관한 사전 정보 (a priori information) 에 기반한 벌칙 함수를 목적함수에 추가하는 정규화 기법이 널리 사용된다 [5].

본 논문에서 제안하는 벌칙함수는 다음과 같다. 먼저 에지 기반 방법에서 사용한 것과 유사하게 공간상에서 인접한 B-spline 계수간의 변동, 즉, 조명의 roughness 를 제한하는 벌칙 함수이다 [4]. 이는 불균일 조명이 공간상에서 급속히 변동하지 않는다는 사실에 기반을 둔 것으로 벌칙함수 $R(\underline{b})$ 는 식 (5)와 같이 정의된다.

$$R(\underline{b}) = \sum_{j=1}^{L-1} (b_j - b_{j+1})^2 \tag{5}$$

에지 기반 방법에서는 식 (5)와 같은 벌칙 함수의 추가함으로써 well-posedness 를 보장할 수 있었으나 [4], 모듈 기반 방법의 경우 추정하고자 하는 조명과 모듈의 밝기 값이 서로 교환되는 효과가 있으므로 식 (5)의 벌칙함수만으로는 well-posedness 를 보장할 수가 없게 된다. 예를 들면 조명의 강도가 2배 증가한 것과 모듈의 밝기 값들이 2배 증가한 것이 같은 효과를 가지므로 유일한 해를 발견할 수 없게 된다. 이를 극복하기 위해서 본 논문에서는 바코드 모듈의 크기 값이 0 또는 1 이라는 사전 정보를 활용하여 식 (6)과 같이 정의되는 벌칙함수 $P(\underline{\alpha})$ 를 설계한다.

$$P(\underline{\alpha}) = \sum_{i=1}^N [\alpha_i (\alpha_i - 1)]^2 \tag{6}$$

$P(\underline{\alpha})$ 는 모듈의 크기가 0 또는 1 로 구성되어 있을 때 최소값을 가지는 함수로써 신호의 이진성 (binariness) 을 정의하는 데에 효과적으로 사용되었었다 [7].

본 논문에서 제안하는 바코드 신호의 동시 불균일 조명 보상, 디블러링 알고리즘은 식 (4) 에 식 (5), (6)의 벌칙함

수들을 부가한 목적함수를 최소화하는 인수를 발견하는 비선형 최소자승 문제로 식 (7)과 같이 정의된다.

$$\hat{\theta} = \arg \min_{\theta} \sum_{i=1}^N (y_i - I_i(\theta)x_i(\theta))^2 + \lambda R(b) + \mu P(\alpha) \quad (7)$$

이때 $\theta = [\alpha, t_b, t_f, \sigma, b]$ 는 추정하고자 하는 모든 인수들을 나타낸다. λ, μ 는 정규화 인수로서 각각 관측 신호 $y(t)$ 에 가해진 불균일 조명의 roughness 정도와 모듈의 크기가 0 또는 1로 이진화 정도를 조절하여 준다. 식 (7)로 정의된 목적함수를 최소화하는 비선형 최소 자승문제는 λ, μ 가 양수인 경우 well-posed 임은 선행 연구에서와 유사한 방법으로 보일 수 있다 [4].

식 (7)로 정의되는 목적함수를 최소화하는 방법으로는 Gauss-Newton 방법을 적용한다. 식 (7)의 목적함수가 well-posed 이므로 목적함수의 Hessian 행렬은 역행렬이 존재하므로 따라서 Gauss-Newton 방법을 효과적으로 적용할 수 있게 된다 [4].

2.2. 초기값 추정

최적화를 효과적으로 수행하기 위해 추정하고자 하는 인수 $\theta = [\alpha, t_b, t_f, \sigma, b]$ 에 대해 적절한 초기값을 정하는 것은 매우 중요한 문제이다 [8]. 효과적인 초기값의 설정을 위하여 본 논문에서는 다음과 같은 방법을 제안한다. 먼저, 바코드 시작점 t_b 와 끝점 t_f 는 에지 검출기를 통해서 얻어진 위치를 초기 위치로 추정한다. 영상에 가해진 불균일 조명은 신호의 2차 미분값이 음수인 positive 피크 위치들의 피크 값을 이용한 nonuniform interpolation 방법을 사용하여 추정한다 [9]. 이를 위하여, 그림 1(a), (b)에 예시된 바와 같이 획득된 신호를 저역 통과 필터링을 통해 잡음을 감소시킨 후, 그림 1(a)에 나타난 바와 같이 positive 피크들을 검출하고 이를 이차 함수로 연결하는 곡선으로 초기 조명의 모양을 우선 추정한다. 추정된 이차 곡선으로부터 B-spline 계수들의 초기값을 추정하기 위하여 이차 곡선과의 MSE를 최소화하는 B-spline 계수 $b_j(j=1,2,\dots,M)$ 를 least square 방법으로 발견하여 이를 b 의 초기값으로 정한다. 그리고 관측된 신호의 모듈의 크기를 초기 불균일 조명의 값으로 나누어 이를 모듈의 크기 값 α 의 초기값으로 설정한다.

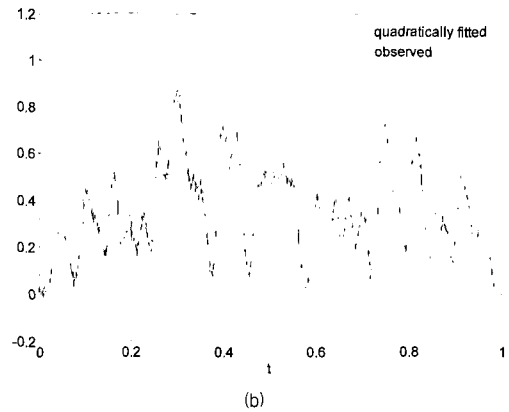
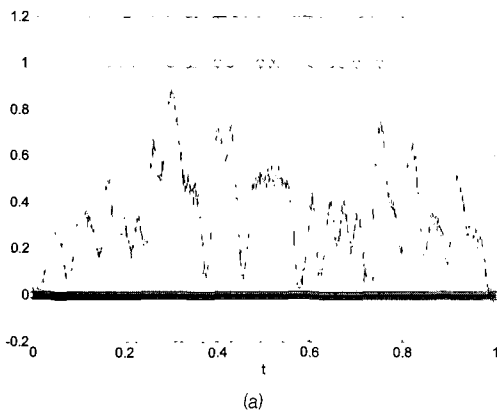


그림 1 초기값 추정 (a) positive 피크점들 (b) 초기 조명 곡선
Fig. 1 Initial estimation (a) positive peaks (b) initial illumination

3. 실험 결과 및 토론

제안하는 알고리즘의 성능을 검증하기 위하여 UPC (Universal Product Code)-A 바코드 영상을 이용하여 실험을 수행하였다. UPC-A 바코드 패턴은 12자리의 숫자와 가드패턴 등으로 총 95개의 모듈로 구성되어 있다. 그림 2는 '012345678905'를 나타내는 UPC 바코드 패턴이다.

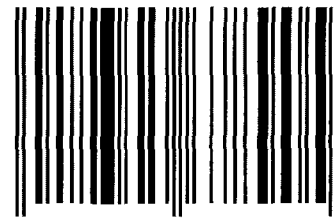
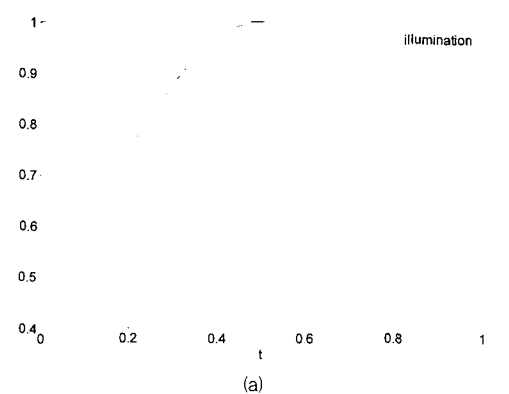


그림 2 UPC-A 바코드
Fig. 2 UPC-A barcode

그림 2와 같은 바코드 영상을 가로 방향으로 스캔한 1D 신호에 가우시안 블러링 함수로 컨볼루션 (convolution) 연산을 수행한 후 그림 3 (a),(b)에 나타난 것과 같은 중앙부가 밝은 형태의 불균일 조명과 우측이 밝은 형태의 조명을 인가한 후 백색 가산 잡음을 더하였다.



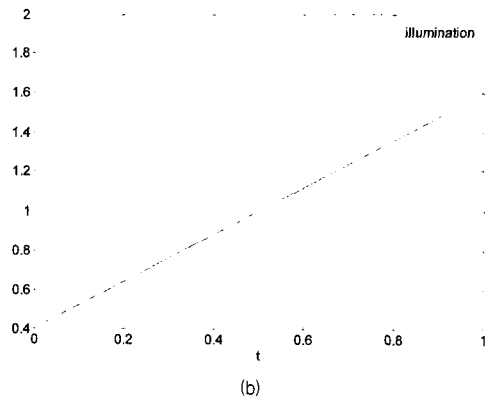


그림 3 불균일 조명 (a) 중앙부가 밝은 형태 (b) 우측이 밝은 형태

Fig. 3 Nonuniform illumination (a) whose central part is brighter (b) whose right part is brighter

그림 4 (a),(b)는 이와 같은 과정을 통하여 각각 얻어진 바코드 획득 신호이다. 그림 4의 각 신호의 SNR (Signal to Noise Ratio) 은 20 dB이다.

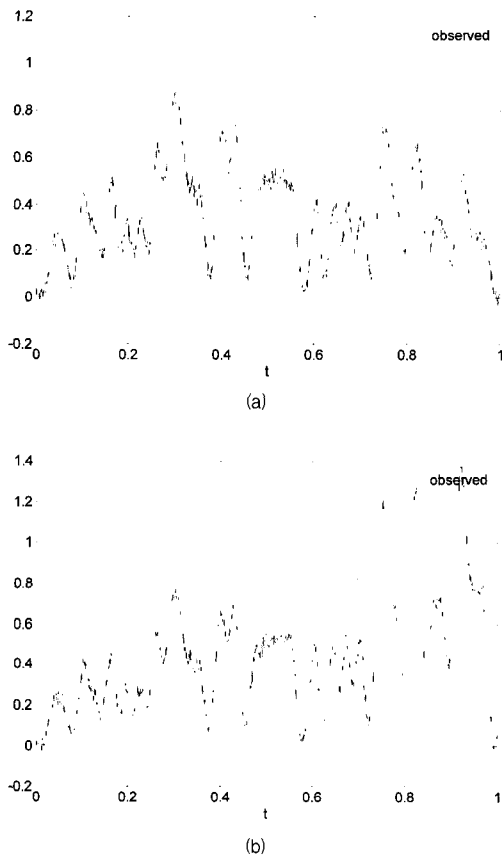
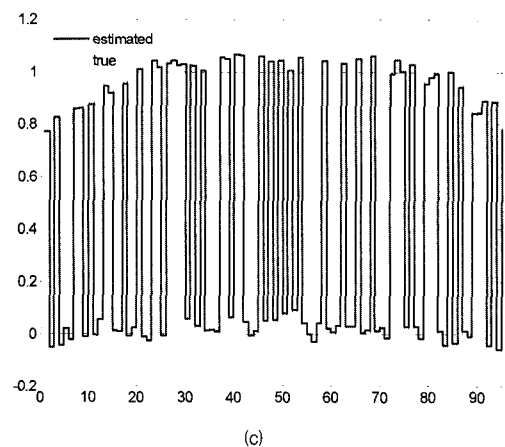
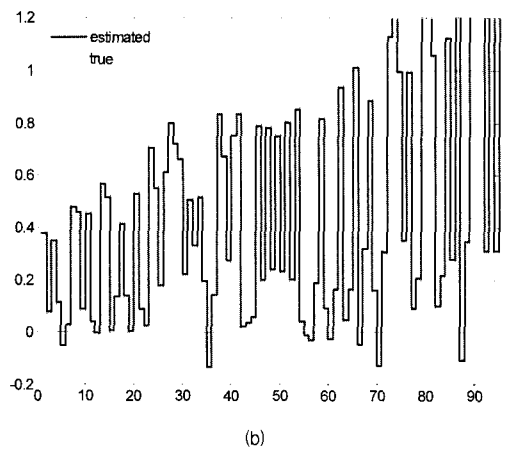
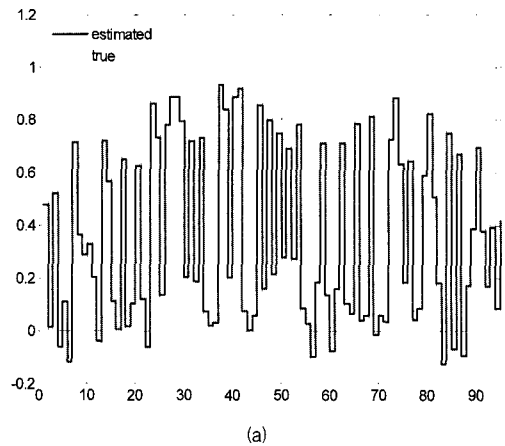


그림 4 시뮬레이션 바코드 영상 (a) 중앙부가 밝은 형태 (b) 우측이 밝은 형태

Fig. 4 Simulated barcode signals under nonuniform illumination (a) whose central part is brighter (b) whose right part is brighter

그림 4의 1D 바코드 신호를 불균일 조명을 고려하지 않은 기존 방법과 본 논문에서 제안한 불균일 조명 및 디블러링을 보상하는 방법을 사용하여 복원하였다. 그림 5의 (a),(b)는 불균일 조명을 고려하지 않은 기존방법을, (c),(d)는 제안하는 방법을 사용하여 그림 4(a)의 중앙부가 밝은 형태의 불균일 조명이 가해진 바코드 신호를, 그림 4(b)의 우측이 밝은 형태의 조명이 가해진 바코드 신호를 각각 복원한 모듈의 크기 값들이다.



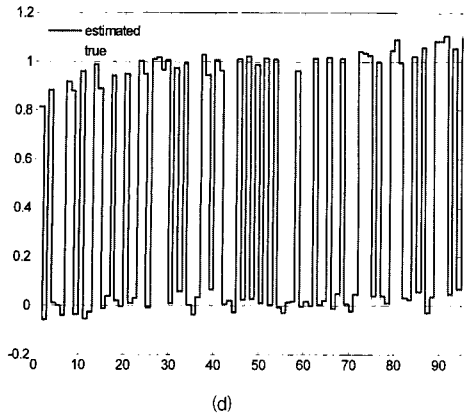


그림 5 복원된 모듈 값들 (a) 불균일 조명을 고려하지 않은 방법을 사용하여 그림 4(a)의 바코드 신호를 복원했을 때의 모듈 값 (b) 불균일 조명을 고려하지 않은 방법을 사용하여 그림 4(b)의 바코드 신호를 복원했을 때의 모듈 값 (c) 제안하는 방법을 사용하여 그림 4(a)의 바코드 신호를 복원했을 때의 모듈 값 (d) 제안하는 방법을 사용하여 그림 4(b)의 바코드 신호를 복원했을 때의 모듈 값

Fig. 5 Restored modules from (a) Fig. 4(a) without nonuniform illumination compensation (b) Fig. 4(b) without nonuniform illumination compensation (c) Fig. 4(a) using the proposed method (d) Fig. 4(b) using the proposed method

그림 5 (a),(b)에서 볼 수 있듯이 불균일 조명을 고려하지 않은 경우에는 불균일 조명의 효과가 보상되지 않아서 추정된 모듈의 크기 값들이 원래의 크기 값들에서 많은 오차를 가지고 있음을 볼 수 있다. 뿐만 아니라 스페이스 모듈의 크기 값이 바 보다 작게 추정되는 경우가 발생하여 복호 오차가 발생한다. 이에 반하여 그림 5 (c),(d) 에서 볼 수 있듯이, 제안하는 방법은 바코드 신호파형에 가해진 조명 곡선과 모듈의 크기를 동시에 추정함으로써 기존 방법보다 모듈의 값들을 정확히 추정하고 있음을 알 수 있다. 또한 복호화 오차 또한 발생하지 않는다.

그림 6은 제안하는 방법을 통해 추정된 불균일 조명을 보여 준다. 실제의 불균일 조명과 유사한 추정을 통하여 불균일 조명 효과를 보상하고 있음을 알 수 있다. 추정된 조명이 실제의 불균일 조명과 완전히 일치하지 않은 것은 잡음 효과 등에 기인한 것이다.

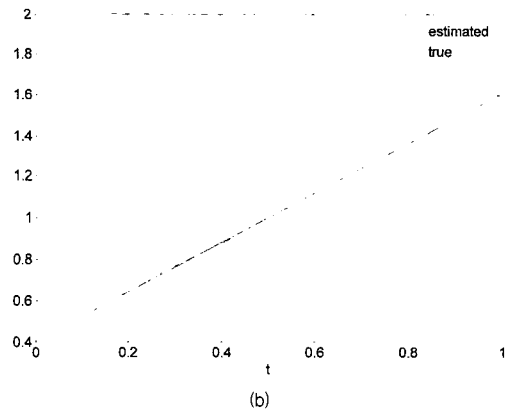
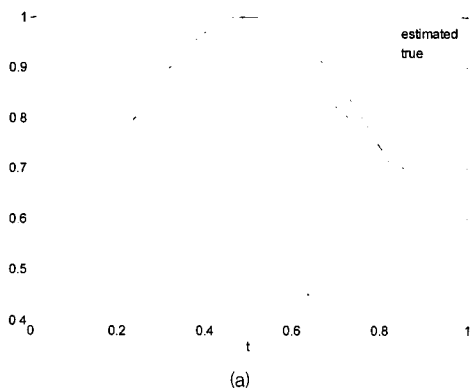


그림 6 추정된 불균일 조명 곡선 (a) 중앙부가 밝은 형태 (b) 우측이 밝은 형태

Fig. 6 Estimated nonuniform illumination (a) whose central part is brighter and (b) whose right part is brighter

불균일 조명을 보상하지 않는 기존 방법과 비교하여 제안한 방법의 성능을 계량화하여 평가하기 위하여 블러링 커널과 SNR 을 달리한 관측신호를 생성하여 식 (8)과 같이 각 방법으로 구한 모듈의 크기 값들의 ME (Maximum of absolute Errors) 를 구하였다. 바코드 신호의 경우에는 하나의 모듈 값이라도 잘못 추정되면 복호가 불가능하므로 ME 로 성능을 평가하는 것이 일반적이다 [4].

$$ME = \max_i |\alpha_i - \alpha_i^{true}|, \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (8)$$

표 1은 중앙부가 밝은 형태의 불균일 조명 하에서 50번의 각기 다른 잡음에 대하여 측정된 ME 값들의 평균이다.

표 1 중앙부가 밝은 형태의 불균일 조명 하에서 블러링 커널과 SNR을 달리 했을 때의 평균 ME ($\lambda = 10, \mu = 0.1$)

Table 1 Average ME under various kernels and SNR under the nonuniform illumination whose central part is brighter ($\lambda = 10, \mu = 0.1$)

σ	제안하는 방법			제안하는 방법		
	SNR			SNR		
	15dB	20dB	25dB	15dB	20dB	25dB
0.004	0.3078	0.2627	0.2567	0.5841	0.5206	0.5160
0.005	0.3075	0.2667	0.2653	0.6193	0.5377	0.5180
0.006	0.3102	0.2853	0.2663	0.6342	0.5389	0.5206
0.007	0.3144	0.2899	0.2773	0.7588	0.5589	0.5209
0.008	0.4125	0.3512	0.2827	1.1490	0.7042	0.5448
0.009	0.8443	0.6987	0.5238	1.5812	1.3451	0.8425

그림 7은 표 1의 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 제안하는 알고리즘의 성능은 그림 7에서 볼 수 있듯이 제안하는 방법의 ME 값이 기존 방법보다 훨씬 작은 오차를 가지고 있어서 향상된 성능을 보여 준다.

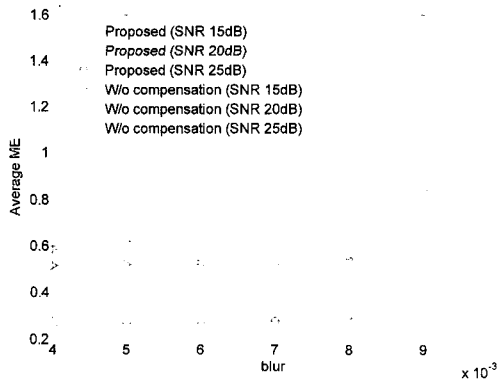


그림 7 그림 4(a) 영상 복호시 ME 값들의 평균
Fig. 7 Average ME in decoding Fig. 4(a) image

또한 우측이 밝은 형태의 불균일 조명 하에서도 50번의 각기 다른 잡음에 대하여 ME 값들을 측정하여 그 평균을 표 2에 나타내었다. 그림 8에서 확인할 수 있듯이 제안하는 방법의 ME 값이 기존 방법보다 훨씬 작아서 향상된 성능을 보여 준다.

표 2 우측이 밝은 형태의 불균일 조명 하에서 블러링 커널과 SNR을 달리 했을 때의 평균 ME ($\lambda = 10, \mu = 0.1$)

Table 2 Average ME under various kernels and SNR under the nonuniform illumination whose right part is brighter ($\lambda = 10, \mu = 0.1$)

σ	제안하는 방법			제안하는 방법		
	SNR			SNR		
	15dB	20dB	25dB	15dB	20dB	25dB
0.004	0.2409	0.2220	0.2137	0.5917	0.5792	0.5715
0.005	0.2446	0.2227	0.2170	0.5978	0.5774	0.5727
0.006	0.5162	0.2998	0.2190	1.0390	0.5815	0.5698
0.007	0.5930	0.3798	0.3041	1.0126	0.5910	0.5757
0.008	0.6204	0.5591	0.5510	1.0405	0.9171	0.6738
0.009	1.0242	0.6592	0.6537	1.2590	0.9917	0.6726

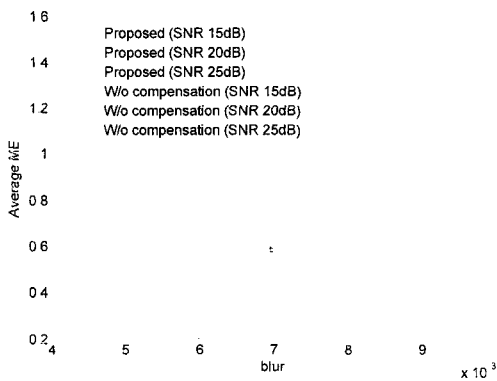


그림 8 그림 4(b) 영상 복호시 ME 값들의 평균
Fig. 8 Average ME in decoding Fig. 4(b) image

제안하는 알고리즘의 최적화 과정의 수렴성은 그림 9에 나타나 있다. 그림 9에서 볼 수 있듯이 Gauss-Newton 알고리즘은 그림 4(a), (b)의 두 가지 신호에 대해서 모두 15번 이내의 반복에서 최적 값에 수렴하는 것을 볼 수 있다. 뿐만 아니라, 그림 9에서 볼 수 있듯이 4-5번 이내의 반복에서 목적함수 값들이 크게 감소하고 있으므로, 실제로는 4-5번 정도의 반복만으로 복호 가능하였다. 이러한 빠른 수렴성은 정규화 과정과 효과적인 초기 값 추정을 통하여 Gauss-Newton 알고리즘을 사용함으로써 가능하게 된 것이다. 제안하는 알고리즘은 빠른 수렴성을 가지고 있으므로, 실시간 바코드 복호에의 적용 가능성이 높다 할 수 있다.

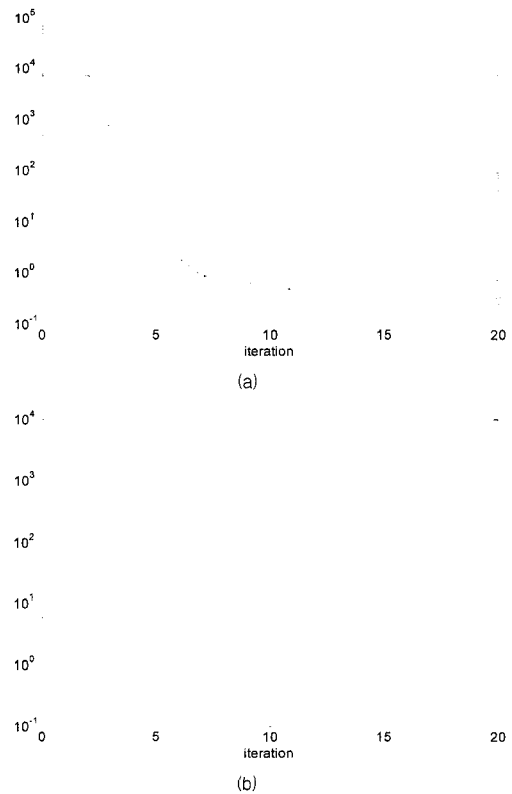


그림 9 최적화 과정 중에서의 목적함수의 변화 (a) 그림 4(a) 영상을 사용한 경우 (b) 그림 4(b) 영상을 사용한 경우

Fig. 9 Change of objective function during optimization under nonuniform illumination using images shown in (a) Fig. 4(a) (b) Fig. 4(b)

제안한 알고리즘의 시뮬레이션 결과는 정규화 인수 λ, μ 를 수동으로 조절하여 얻은 것이다. 정규화 인수 λ, μ 의 값은 추정된 불균일 조명이 빠르게 변화하거나 추정된 영상의 값이 두 밝기 값에서 많이 벗어나면 증가시키는 방식으로 수동으로 조절하였다. 추후 이를 자동으로 조절하는 연구가 필요하다.

제안하는 알고리즘은 에지룰 사용하는 방법에 비하여 2차원 바코드 디블러핑과 불균일 조명 보상에 적용할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 2차원 바코드에 적용하는 경우에는 획득된 2차원 바코드 영상에 존재하는 투사 변환 (perspective transform) 을 보정하는 선처리 과정과 2차원 B-spline 함수

를 사용한 조명 모델 등이 필요하다. 이러한 2차원 동시 불균일 조명 보상 및 디블러링은 추후 연구 과제이다.

4. 결 론

본 논문에서는 바코드를 구성하는 모듈의 개수가 알려진 경우 불균일 조명 하에서 획득된 바코드 영상의 불균일 조명 보상과 디블러링을 동시에 수행하는 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 획득된 신호와 신호모델 사이의 오차의 L_2 norm 과 불균일 조명에 대한 roughness 벌칙 함수, 모듈 크기 이진화에 대한 벌칙 함수의 선형 조합으로 이루어지는 목적함수를 최소화하는 것으로 이루어진다. 제안된 목적함수 최소화는 well-posed 이므로 Gauss-Newton 알고리즘을 사용하여 효과적인 최적화 수행이 가능하였다. 제안된 알고리즘은 불균일 조명에 강인하게 바코드 신호를 복호할 수 있을 뿐만 아니라, 빠른 수렴속도를 가지고 있어서 실시간 복호를 요구하는 바코드 스캐너에 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] E. Joseph and T. Pavlids, "Deblurring of bilevel waveforms," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 2, pp. 223-235, 1993.

[2] W. Turin and R. A. Boie, "Bar Code Recovery via EM Algorithm," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 46, pp. 354-363, 1998.

[3] R. C. Palmer, *The bar code book: reading, printing and specification of bar code symbols*, Helmers Publishing Inc. 1999.

[4] J. Kim and H. Lee, "Joint nonuniform illumination estimation and deblurring for bar code signals," *Optics Express*, Vol. 15, Issue 22, pp. 14817-14837, 2007.

[5] P. E. Gill and W. Murray, "Algorithms for the solution of the nonlinear least-squares problem," *SIAM J. Numer. Anal.*, vol. 15, pp. 977-992, 1978.

[6] M. Unser, "Splines: A perfect fit for signal and image processing," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 16, pp. 22-38, 1999.

[7] T.-H. Li and K.-S. Lii, "A joint estimation approach for two-tone image deblurring by blind deconvolution," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 11, pp. 847- 858, 2002.

[8] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery, *Numerical recipes in C++, 2nd ed.* Cambridge, 2005.

[9] L. Zhang, "Background reconstruction for camera based thin-layer chromatography using the concave distribution feature of illumination," *Optics Express*, vol. 14, pp. 10386-10392, 2006.

저 자 소 개



이 한 아 (李韓娥)

2005년 이화여자대학교 전자정보통신공학과 졸업. 2007년 동 대학원 석사과정 졸업. 2007년 9월-현재 이화여자대학교 전자공학과 박사과정 재학중.
Tel : +82-2-3277-4236
E-mail : lha2k@ewhain.net



김 정 태 (金廷泰)

1989년 서울대학교 제어계측공학과 졸업. 1991년 동 대학원 석사과정 졸업. 1991년-1998년 삼성전자 디지털미디어연구소 책임연구원. 2004년 미시간대학교 전기공학과 졸업 (Ph.D).
2004년-현재 이화여자대학교 전자공학과 조교수
Tel : +82-2-3277-4084
Fax : +82-2-3277-3494
E-mail : jtkim@ewha.ac.kr