램프의 완전 선명화를 이용한 에지 검출기
(An Edge Detector by Using Perfect Sharpening of Ramps)

이 종 구 † 유 철 중 †† 장 옥 배 ††
(Jong Gu Lee) (Cheol Jung Yoo) (Ok Bae Chang)

요 약 국소적 미분 연산자를 이용한 대개의 에지 검출 방법을 사용하면 검출된 에지의 폭이 불균일하게 되거나, 확대된 영상에서 에지의 일부를 검출하지 못한다. 램프 에지의 엄격하게 단조적인 밝기 분포 구간을 단순 계단 함수에 대응시키는 램프 에지의 완전 선명화 사상을 이용하면 밝기분포의 비국소적 속성이 반영되는 변형된 미분이 도입되고, 이를 이용하면 다양한 에지 폭의 변화에 효율적으로 대응할 수 있는 에지 검출기를 구현할 수 있다. 본 논문에서는 MADD를 사용하여 형상의 확대나 다양한 에지 폭의 변화에 안정적으로 동작하는 검출기를 개발하였다. 기존의 알고리즘과 비교하여 본 결과 제안한 알고리즘의 우수성을 확인할 수 있었다.

키워드 : 에지 검출, 램프 에지, 완전 선명화

Abstract Since the usual conventional edge detectors employ the local differential derivatives, the detected edges are not uniform in their widths or some edges are missed out of the detection on magnified images. We employ a mapping from the exactly monotonic intensity distributions of ramp edges to the simple step functions of intensity, which is referred to as perfect sharpening map of ramp edges. This map is based on the non-local feature of intensity distribution and used to introduce a modified differentiation, in terms of which we can construct an efficient edge detector adaptive to the variation of edge width. By adopting the operator MADD in this paper, we developed an edge detector that works stably against the magnification of image or the variation of edge width. It is shown by comparing to the conventional algorithms that the proposed one is very excellent.

Key words : Edge detection, Ramp edge, Perfect sharpening

1. 서 론

에지란 명암 값이 다른 두 영역 사이에 위치한 경계선을 말하며, 에지 검출은 영상 속에 위치한 이런 경계선을 찾는 것을 말한다. 영상에서 에지 검출이 중요한 이유는 영상에서의 대부분의 유용한 정보는 서로 다른 영역간의 경계선에 위치할 뿐 만 아니라 인간의 시각 시스템의 물체를 인식하는데 있어서 대강의 윤곽선만으로도 인식이 가능하기 때문이다[1].

영상장비의 물리적 한계나 그 불균일성으로 인하여 실제 이미지의 에지들은 밝기 변화에서 매우 다양한 폭을 가진 램프 형태로 표현된다. 실제 이미지에서 이러한 에지의 속성을 찾아내고 그 정확한 위치를 지정하기 위하여 밝기 분포에 대한 국소적 미분 대신에 '적응성 방향 미분'(Adaptive Directional Derivative, ADD)이라는 비국소적 연산자를 도입함으로써 에지의 램프 폭의 변화에 무관하게 적용할 수 있는 알고리즘이 개발되었다[2].

기울기 연산자와 같은 국소적 미분 연산자를 이용하는 기존의 에지 검출기들은 에지에서의 밝기 변화[3][4]를 조사하기 위하여 다양하게(길이) 스케일을 변화시키거나 추가적인 필터[5-7]들에 의존함으로써 램프 에지의 비국소적인 특성에 대응하는데 비하여, 램프 에지를 밝기 변화에서 '엄격하게 단조적인 구간'으로 규정하게 되면 ADD의 값과 그 구간의 폭만으로 결정할 수 있다[2]. 가우시안 분포의 적분으로 표시되는 램프 에지의 모형을 예로 들면, 에지 검출에서 사용될 수 있는 최소한 두 개의 독립적인 파라미터가 존재함을 알 수 있다. 하나는 에지에 의한 밝기 변화의 폭(크기)인데 ADD의 값과 일치하고, 다른 하나는 가우시안 분포의 분산으로서 에지의 예리함을 나타내므로 램프구간의 폭과 관계

† 학생회원 : 전북대학교 전자정보공학부
jgleemail@chonbuk.ac.kr
†† 종신회원 : 전북대학교 전자정보공학부 교수
cjyoo@chonbuk.ac.kr
okjang@chonbuk.ac.kr
논문접수 : 2007년 4월 9일
심사완료 : 2007년 7월 26일

된다. 따라서 에지의 두께 등을 고려하지 않는다면, 에지는 램프의 폭이나 길이 스케일에 관계없이 ADD의 값을 측정함으로써 검출될 수 있다.

본 논문에서는, 우선 기존의 에지 검출기 알고리즘에 대하여 알아보고, ADD를 이용한 에지검출기에 대하여 간략하게 다시 고찰한 후, 램프 에지의 엄격하게 단조적인 밝기 변화를 최적의 단순 계단 함수에 대응시키는 '완전 선명화 사상'으로 명명되는 개연적 대응관계를 소개하고 이를 이용하여 ADD를 수정할 것이다. 이 완전 선명화 사상에 의한 단순 계단 함수는 실제 밝기 분포와의 평균제곱오차(mean square error)가 최소화되도록 결정되고, 이렇게 결정된 계단 함수에서의 방향 미분 값을 원래의 밝기 분포에 지정함으로써 '수정된 적응성 방향 미분'(Modified Adaptive Directional Derivative, MADD)을 정의한다. ADD 대신에 MADD를 이용하면, 램프 구간 내에서 방향 미분 값을 가중치로 사용하여 픽셀들의 위치를 평균한 '방향 미분의 국소 중심'(Local Center of Directional Derivative, LCDD)[9] 등의 위치를 찾는 추가적인 과정 없이, 정확한 에지 픽셀의 위치가 완전 선명화 사상에 의한 단순 계단 함수의 위치로 자연스럽게 결정될 수 있다. MADD를 이용한 에지 검출 알고리즘은 수평과 수직의 두 방향에 대한 실행을 결합함으로써 완성되는데, 이 두 방향에서의 에지 검출이 중첩되어 에지가 이중으로 표시되는 결점을 보완하기 위한 정교한 에지 다듬기 과정이 더해져야 한다. 제안한 알고리즘으로 에지 검출기를 구현하여 기존의 에지 검출기들과 비교할 수 있다. 본 논문에서는 기존의 에지검출기인 Canny 알고리즘[8,9]의 결과와 비교함으로써 제안한 알고리즘의 성능을 비교하며, 제안한 알고리즘이 이미지의 확대 여부에 상관없이 에지를 결정할 수 있는 장점이 있다는 것도 보여줄 것이다.

2. 기존의 에지 검출법

에지를 검출은 많은 방법이 존재한다. 대표적으로 미분을 이용한 방법과 Canny 방법, Wavelet 변환 방법 등이 있으며 본 논문에서는 미분을 이용한 방법인 1차 미분 방법과 2차 미분 방법에 대하여 알아보고, 에지 검출의 대표적인 방법인 Canny 방법에 대하여 간략하게 알아보도록 한다.

영상에서 에지를 검출하는 방법으로 미분 연산을 이용할 수 있다. 미분을 이용한 방법으로는 크게 나누어서 1차 미분과 2차 미분이 있다. 1차 미분에 의한 방법으로는 Sobel, Roberts, Prewitt 등의 방법이 있고, 2차 미분에 의한 방법으로는 Laplacian 방법이 있다. 1차 미분에 의한 방법들은 x방향 미분 G_x와 y방향 미분 G_y를 다음과 같은 2차원 열 벡터 마스크로 정의하여 사용한다[10,11].

$$\begin{array}{cccc} & \text{Sobel} & \text{Roberts} & \text{Prewitt} \\ G_x & \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \\ G_y & \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \end{array}$$

Roberts 마스크는 다른 검출기보다 크기는 작지만 효과적으로 사용할 수 있고 잡음에 민감하게 반응한다. Prewitt 마스크는 대각 방향의 에지보다는 수평과 수직 에지에 민감하게 반응하여 수평과 수직 에지를 잘 검출한다. 반면 Sobel 마스크는 수평과 수직 에지 보다는 대각선 방향의 에지에 더욱 민감하게 반응한다. 1차 미분에 의한 에지 검출 방법들은 에지가 존재하는 영역을 지날 때에 반응하는 부분이 많이 나타난다. 이것은 특히 완만한 경사를 이루는 에지일 경우에는 더욱 두드러지게 나타난다[12-14].

Laplacian 방법은 에지의 방향을 단일화하기 때문에 다른 방법들과 구분된다. Laplacian을 이용한 에지 검출은 1차 미분을 이용한 방법에 비해 더욱 가늘고 선명한 에지를 얻을 수 있다. 그러나 잡음에 민감하여 더 많은 에지를 검출하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 많이 쓰이는 방법은 3×3 마스크를 씌운 후, 그 안에서 최대·최소의 중심 값으로 정하는 방법이 있다. 따라서 임계값이 낮을수록 에지는 더 많이 검출된다. Laplacian 방법은 다음과 같은 종류의 마스크를 이용한다[12].

$$\begin{array}{cc} \text{Laplacian 4} & \text{Laplacian 8} \\ \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \end{array}$$

Canny는 에지를 검출하는데 3가지 성능평가 기준인 오류율(error rate), 국소화(localization), 반응성(response)을 만족하는 에지검출 방법을 제시하였다[10,12]. 위의 기준을 만족하는 Canny 에지 검출 방법의 알고리즘은 여러 가지가 있으며 기본적인 원리는 가우시안 필터링 후에 x, y축으로 기울기를 계산하여 기울기의 강도를 계산한다. 그러한 후에 가짜에지(false-positive)를 제거 또는 억제하기 위하여 이중 경계값을 이용한 hysteresis 처리로 다른 에지 방법에 비하여 좋은 에지 검출 결과를 얻을 수 있다[8].

3. 램프 에지에 대한 적응성 방향 미분

광학적 조건이나 샘플링의 효율 및 그 밖의 다른 영상 획득의 불완전성으로 인하여 실제 이미지의 에지들은 흐려져서 램프 모양의 밝기 분포를 생성한다. 그런

데, 점진적으로 변하는 그레이 레벨의 밝기를 갖는 램프 에지에 대하여 기울기나 방향 미분 같은 국소적 연산자에 의한 기준을 적용하면 에지를 누락하거나 여러 개의 픽셀에 걸쳐 중복 검출하게 된다.

램프 에지를 적절하게 검출하기 위하여 대응하는 1차원적 밝기 분포에 대하여 적응성 방향 미분을 활용한다. 이미지의 픽셀들은 가령 p와 같은 2-D 위치 벡터로서 표시된다. 그러면 임의의 θ-방향으로 픽셀 p를 가로지르는 1-D 단면의 밝기 분포는 방향벡터 u_θ에 의하여 주어지는 선형 시퀀스 $\{p+qu_\theta;\ q\in Z\}$의 한 부분에서 정의되며 그레이 레벨 값을 갖는 함수인 $f(p+qu_\theta)$로 기술된다. 주요 방향벡터 u_θ는 식 (1)과 같이 정의된다.

$$u_{\pm x}\equiv\pm(1,0),\qquad u_{\pm y}\equiv\pm(0,1),\qquad u_{\pm +}\equiv\pm(1,1),\qquad u_{\pm -}\equiv\pm(1,-1). \tag{1}$$

밝기 분포에 대한 θ 방향의 미분은 식 (2)와 같이 정의된다.

$$v_\theta(p)\equiv D_\theta f(p)=f(p+u_\theta)-f(p), \tag{2}$$

이미지의 픽셀 공간에서 $q\in Z$인 θ-방향의 1-D 밝기 분포 $f(p+qu_\theta)$는 엄격하게 단조적인 밝기변화 구간이나 상수 밝기 구간들의 연쇄로 나눠지므로, 이렇게 나눠진 각각의 구간 중의 하나의 구간 $0<q<w$는 식 (3)으로 표현할 수 있다.

$$[p,\ p+wu_\theta]\equiv\{p+qu_\theta\ ;\ q=0,1,\ldots,w\} \tag{3}$$

미분을 비국소적으로 확장하여 각각의 픽셀에 대응시키는 ADD는 이 구간의 마지막 픽셀인 $p+wu_\theta$를 제외한 나머지 픽셀에서 식 (4)로 정의된다.

$$\Delta_\theta(p+qu_\theta)=\begin{cases}\sum_{k=0}^{w-1}v_\theta(p+ku_\theta), & q=0\\ 0, & q=1,2,\ldots,w-1\end{cases} \tag{4}$$

식 (4)의 정의에 의하여 $\Delta_\theta(p)$는 p가 θ-방향에서 f의 값이 엄격하게 단조적인 구간이 시작되는 픽셀일 경우만 '0'이 아닌 값을 갖는다. 즉, 만일 f가 p에서 θ-방향으로 엄격하게 단조 증가 또는 감소를 시작해서 $p+wu_\theta$에서 끝난다면 $\Delta_\theta(p)$는 식 (5)가 된다(그림 1 참조).

$$\Delta_\theta(p)=\sum_{k=0}^{w-1}v_\theta(p+ku_\theta)=f(p+wu_\theta)-f(p)\equiv A \tag{5}$$

마지막 픽셀인 $p+wu_\theta$은 이어지는 다음 구간의 시작 픽셀이 되므로 다음 구간의 시작 픽셀에 대한 ADD의 값이 지정된다. 엄격하게 단조적인 구간인 $[p,\ p+wu_\theta]$에서 $0<q<w$인 q에 대하여 $v_\theta(p+qu_\theta)=-v_{-\theta}(p+(q+1)u_\theta)$인 성질은 밝기 변화의 전체량인 $\Delta_\theta(p)=-\Delta_{-\theta}(p+wu_\theta)=A$와 $\Delta_\theta(p+qu_\theta)=0$인 결과로 나타난다. 그러므로 ADD인 Δ_θ가 주어진 램프 에지에 대하여, 정해진 θ-방향의 엄격하게 단조적인 밝기 변화의 구간 $[p,\ p+wu_\theta]$와 함께, 그에 따른 밝기 변화의 폭을 제시함을 알 수 있다.

따라서 Δ_θ에 대하여 일정한 임계값 T를 부여하면 램프 에지를 결정하는 기준(Criterion for Ramp Edges; CRE)을 구할 수 있다. CRE는 주어진 픽셀 p에서의 그레이 레벨의 적응성 방향 미분 중 하나의 절대 값이 임계값 T보다 크거나 같다. 즉, 적어도 하나의 θ-방향에 대하여 $|\Delta_\theta(p)|\geq T$.

이미지 내에서 밝기 변화 A에 의해 두 부분을 경계 짓는 램프 에지에 대하여, 에지의 법선 방향으로부터 ϕ의 각도를 이루는 방향을 'ϕ-방향'이라고 하자. 또한, 같은 방향의 방향 벡터와 램프 폭을 각각 u_ϕ와 w_ϕ라고 하면, p에서 시작되는 ϕ-방향의 램프 단면은 구간 $[p,\ p+w_\phi u_\phi]$에 걸친 엄격하게 단조적인 그레이 레벨의 분포로 기술된다. u_0는 에지의 법선 방향이고 $u_{\pm\pi/2}$는 접선 방향을 나타낸다. 만일 에지가 u_0의 양의 방향으로 볼록하다면 $-\pi/2\leq\phi\leq\pi/2$인 모든 ϕ에 대하여 $\Delta_\phi(p)=A$가 된다. 만일 에지가 u_0의 양의 방향으로 오목하다면 $\phi=0$에 근처의 한정된 범위의 각도 내에서만 $\Delta_\phi(p)=A$가 되고, 분명히 $\phi=\pm\pi/2$에서는 $\Delta_\phi(p)=0$이 된다. 그러므로 램프 에지에 의한 밝기 변화를 ADD인 Δ_θ의 값을 이용하여 효과적으로 검출하기 위하여 적어도 서로 직각을 이루는 고정된 두 방향 θ_1과 θ_2에 대한 ADD인 Δ_{θ_1}과 Δ_{θ_2}이 필요하다.

θ-방향의 그레이 레벨의 엄격하게 단조적인 분포 구간 중에서 국소적으로 최대 길이를 갖는 (즉, 자신을 포함하는 엄격하게 단조적인 구간이 없는) $[p,\ p+wu_\theta]$가 $|f(p+wu_\theta)-f(p)|\geq T$을 만족한다면, 위의 (CRE) 기준에 따라 에지의 램프 구간이 되고, 이 구간의 $w+1$개의 픽셀 중 하나가 정확한 에지 픽셀로 지정되어야한다. 모든 방향의 에지를 검출하는 것은 서로 직각인 두 방향에 대한 ADD인 $\Delta_{\theta_1}(p)$와 $\Delta_{\theta_2}(p)$를 이용하여 이루어질 수 있는데, 실제적으로 $\theta_1=x$와 $\theta_2=y$의 고정된 두 방향을 사용할 수 있다. 여기서 (CRE) 기준을 이용하면 에지 폭 w에 영향을 주는 공간적 흐려짐이나 크기변화에 무관하게 에지를 검출할 수 있음을 알 수 있지만, 램프 구간 $[p,\ p+wu_\theta]$로부터 정확한 하나의 에지 픽셀 위치를 결정하기 위해서는 완전 선명화 사상을 적용할 필요가 있다.

4. 수정된 방향성 미분과 램프 에지의 완전 선명화

램프 에지는 이미지 내에서 어떤 방향의 1차원 밝기 분포가 엄격하게 단조적인 구간이 되는 것으로 파악되

는데, 이를 완전 선명화한 결과로서 얻게 되는 이상적인 계단 함수를 생각할 수 있다. 즉, 각각의 램프 에지들은 램프 전체에 걸친 밝기의 총 변화량과 일치하는 높이를 갖고 램프 내의 특정한 픽셀에 위치하는 유일한 계단 에지에 대응시킬 수 있다. 만일 각각의 램프 에지에 유일한 계단 에지를 위치시킬 수 있는 적절한 원칙이 주어진다면, 램프 에지에 대응되는 이상적인 계단 에지의 밝기에 대한 방향 미분을 램프 에지에 지정할 수 있고, 이를 1-D 밝기 분포가 이 엄격하게 단조적인 함수가 되는 해당 방향의 MADD로 정의할 수 있다. 예를 들어 q의 구간 $[0, w]$에 걸쳐서 엄격하게 단조적인 1-D 밝기 분포 $f(q)$가 램프 에지를 나타내고 $f(0)=B$, 그리고 $f(w)=A+B$이라면, 대응되는 이상적인 계단 에지의 밝기 분포는 구간 $[0, w]$ 내의 적절한 q_E에 대하여 식 (6)으로 표현된다(그림 1 참조).

$$f_s(q)=\begin{cases}B, & 0\le q\le q_E\\ A+B, & q_E<q\le w\end{cases} \tag{6}$$

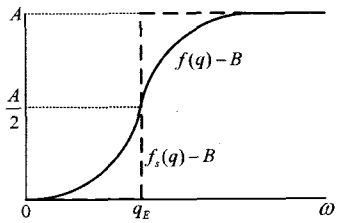


그림 1 램프 에지 구간의 완전 선명화

픽셀 공간에서 나타내면 f_s의 방향 미분은, q가 정수 값을 가져야 하므로 식 (7)과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial f_s}{\partial q}(q)\equiv f_s(q+1)-f_s(q)=\begin{cases}A, & q=[q_E]\\ 0, & q\neq[q_E]\end{cases} \tag{7}$$

만일 $S: f\to f_s$의 대응관계가 각각의 엄격하게 단조적인 함수 f에 대하여 동일한 변동 폭을 갖는 유일한 계단 함수 f_s를 지정할 수 있도록 잘 정의된다면, f의 MADD는 $q\in[0, w]$인 모든 q에 대하여 식 (8)로 정의된다.

$$\tilde{\Delta}_f(q)\equiv\frac{\partial f_s}{\partial q}(q) \tag{8}$$

사상 S가 완전하게 정의되려면 아직 적절한 계단의 위치 q_E를 결정하는 것이 남았다. 이를 결정하는 적절한 원칙은 사상 S에 의한 평균제곱오차 $MSE(S)$를 최소화하는 것이다. 만일 밝기의 분포가 독립적이고 동일한 조건으로 생성되어서 특정한 $f_s(q)$에 대한 가중치가 균일하게 $P(f_s;\ q)=1$으로 주어진다면 평균제곱오차는 식 (9)가 된다.

$$\begin{aligned}MSE(S)&=\int_0^w P(f_s;\ q)[f_s(q)-f(q)]^2dq \\ &=\int_0^w [f_s(q)-f(q)]^2dq \\ &=\int_0^{q_E}[B-f(q)]^2dq+\int_{q_E}^w[A+B-f(q)]^2dq,\end{aligned} \tag{9}$$

$MSE(S)$를 최소화하는 q_E의 값은 수식 (10)을 만족하는데,

$$\frac{d}{dq_E}MSE(S)=[B-f(q_E)]^2-[A+B-f(q_E)]^2=0, \tag{10}$$

여기서 $q=q_E$에서 만족되어야할 계단 위치 결정 조건(Step Locating Condition; SLC)은 다음과 같이 됨을 알 수 있다.

$$\text{(SLC)}\qquad f(q_E)-B=\frac{A}{2}$$

엄격하게 단조적인 함수에 대하여 SLC를 만족하는 $q=q_E$인 위치는 유일하게 결정된다. f자체가 계단 함수이거나 상수 함수이면 $MSE(S)$의 최소 값은 당연히 $f_s=f$에서 이루어지고 SLC를 적용할 필요 없이 완전 선명화 사상 S가 정의된다.

이미지의 픽셀 공간에서 $q\in Z$인 θ-방향의 1-D 밝기 분포 $f(\boldsymbol{p}+q\boldsymbol{u}_\theta)$는 엄격하게 단조적인 밝기 구간이나 상수 밝기 구간들의 연쇄로 나누어지며 이들 구간 각각에 대하여 완전 선명화 사상 S가 계단 함수나 상수 함수를 대응시킬 수 있으므로 밝기 분포의 전체 단면에 걸쳐서 자연스럽게 확장할 수 있고, $f_s(\boldsymbol{p}+q\boldsymbol{u}_\theta)$와 함께 $f(\boldsymbol{p}+q\boldsymbol{u}_\theta)$의 MADD가 식 (11)과 같이 θ-방향의 전체 밝기 분포 단면에 걸쳐서 정의될 수 있다.

$$\tilde{\Delta}_\theta(\boldsymbol{p}+q\boldsymbol{u}_\theta)=\frac{\partial f_s}{\partial q}(\boldsymbol{p}+q\boldsymbol{u}_\theta)\equiv f_s(\boldsymbol{p}+(q+1)\boldsymbol{u}_\theta)-f_s(\boldsymbol{p}+q\boldsymbol{u}_\theta) \tag{11}$$

픽셀 공간에서 표시된다면, (SLC) 조건은 엄격하게 단조 증가인 구간(Increasing Step Locating Condition; ISLC)에 대해서는 다음과 같이 표현되고,

$$\text{(ISLC)}\quad f(\boldsymbol{p}+[q_E]\boldsymbol{u}_\theta)-B\le\frac{A}{2}<f(\boldsymbol{p}+([q_E]+1)\boldsymbol{u}_\theta)-B$$

엄격하게 단조 감소인 구간(Decreasing Step Locating Condition; DSLC)에 대해서는 다음 수식과 같이 표현된다.

$$\text{(DSLC)}\quad f(\boldsymbol{p}+[q_E]\boldsymbol{u}_\theta)-B\ge\frac{A}{2}>f(\boldsymbol{p}+([q_E]+1)\boldsymbol{u}_\theta)-B$$

θ-방향의 엄격하게 단조적인 구간 $[\boldsymbol{p},\ \boldsymbol{p}+w\boldsymbol{u}_\theta]$에 대하여 $f(\boldsymbol{p}+w\boldsymbol{u}_\theta)-f(\boldsymbol{p})=A$일 때, MADD의 값 $\tilde{\Delta}_\theta(\boldsymbol{p}+q\boldsymbol{u}_\theta)$은 $q=0, 1, 2\ldots w-1$에 대하여, $q=[q_E]$일 경우는 $\tilde{\Delta}_\theta(\boldsymbol{p}+q\boldsymbol{u}_\theta)=A$이고 그 외의 경우에는 $\tilde{\Delta}_\theta(\boldsymbol{p}+q\boldsymbol{u}_\theta)=0$이

된다. 따라서 MADD를 산정함으로써 중요한 밝기 변화 A와 그 적절한 위치 $q=[q_E]$를 동시에 검출할 수 있음을 알 수 있다. ADD의 값 Δ_θ 대신에 MADD의 값 $\tilde{\Delta}_\theta$를 사용한다면 에지 픽셀을 검출하고 그 위치를 결정하는 것은 단순히 $\tilde{\Delta}_\theta$에 대한 기준을 설정함으로써 이루어질 수 있다.

즉, 픽셀 $\boldsymbol{p}$에서 밝기에 대한 어떤 θ-방향의 MADD가 $|\tilde{\Delta}_\theta(\boldsymbol{p})|\geq T$를 만족하면 이 픽셀이 에지 픽셀이 된다.

위의 엄격하게 단조적인 구간 $[\boldsymbol{p},\ \boldsymbol{p}+w\boldsymbol{u}_\theta]$에 대해서는, $|A|\geq T$이라면 $|\tilde{\Delta}_\theta(\boldsymbol{p}+[q_E]\boldsymbol{u}_\theta)|\geq T$이 되고, 이 기준에 따라 $\boldsymbol{p}+[q_E]\boldsymbol{u}_\theta$는 에지 픽셀로 검출된다. $\tilde{\Delta}_\theta(\boldsymbol{p}+[q_E]\boldsymbol{u}_\theta)=\Delta_\theta(\boldsymbol{p})$이므로 두 개의 직교하는 방향에 대한 MADD인 $\tilde{\Delta}_{\theta_1}$과 $\tilde{\Delta}_{\theta_2}$은 ADD와 마찬가지로 이미지의 모든 에지들을 뽑아낼 수 있다. 이미지의 모든 에지들을 검출하기 위하여 직교하는 MADD인 $\tilde{\Delta}_x$와 $\tilde{\Delta}_y$를 사용할 수 있지만 에지의 어떤 부분들은 $\tilde{\Delta}_x$와 $\tilde{\Delta}_y$ 각각에 의하여 이중으로 검출될 수 있다. 특히 에지가 큰 곡률로 휘어져있을 때, 검출된 에지 픽셀들이 섬모 같은 털이나 있는 에지 선을 형성할 수 있다. 그러므로 매끄러운 에지 라인을 얻기 위해서는 경우에 따라 두 MADD $\tilde{\Delta}_x$와 $\tilde{\Delta}_y$ 중의 적절한 하나만을 사용하여 에지를 검출할 수 있도록 하는 배타적 조건이 제시되어야 한다. 적절한 조건으로서, 예를 들면, $|v_x|$가 $|v_y|$보다 크면 $\tilde{\Delta}_x$만을 에지 검출에 이용하고 반대의 경우에는 $\tilde{\Delta}_y$를 이용하도록 제한한다. 그리하여 $\tilde{\Delta}_x$와 $\tilde{\Delta}_y$를 사용한 에지 픽셀 검출 방법을 다음의 프로시저로 정리할 수 있다(그림 2).

에지 폭의 크기를 나타내는 파라미터인 w_x나 w_y는 이미지의 공간적인 흐려짐이나 스케일링과 연관되는데, 위의 프로시저는 이러한 파라미터의 값 또는 효과들과 무관하게, 엄격하게 단조적인 구간에 걸쳐서 발생한 전체 밝기 변화의 절반에 해당하는 변화가 $q=[q_E]$에서 또는 $[q_E]$와 $[q_E+1]$ 사이에서 발생하게 되는 $q=[q_E]$의 픽셀을 결정함으로써, 정확한 에지 픽셀을 뽑아낼 수 있음을 알 수 있다. 실제로 이미지를 κ배 확대하는 것은, $\kappa\boldsymbol{p}$와 κw_x, κw_y, $[\kappa q_E]$ 등으로 바뀌는 것을 제외하면, 이 프로시저의 결정적 조건인 $|\tilde{\Delta}_x(\kappa\boldsymbol{p}+[\kappa q_E]\boldsymbol{u}_x)|\geq T$와 $|v_x(\kappa\boldsymbol{p}+[\kappa q_E]\boldsymbol{u}_x)|\geq|v_y(\kappa\boldsymbol{p}+[\kappa q_E]\boldsymbol{u}_x)|$에는 전혀 차이가 생기지 않는다. 사실 ADD는 $v_\theta(\kappa\boldsymbol{p}+\kappa q\boldsymbol{u}_\theta)=(1/\kappa)v_\theta(\boldsymbol{p}+q\boldsymbol{u}_\theta)$으로 변하고, 더구나 MADD는 $\tilde{\Delta}_\theta(\kappa\boldsymbol{p}+\kappa q\boldsymbol{u}_\theta)=\tilde{\Delta}_\theta(\boldsymbol{p}+q\boldsymbol{u}_\theta)$로 되어 변하지 않는다. 따라서 위의 프로시저는 v_θ와 같은 국소적 미분을 사용하는 보통의 에지 검출기와는 달리 이미지의 스케일링을 넘어서는 확고부동한 성능을 가진다.

에지 검출의 전체 과정은 이미지의 모든 수평선과 수

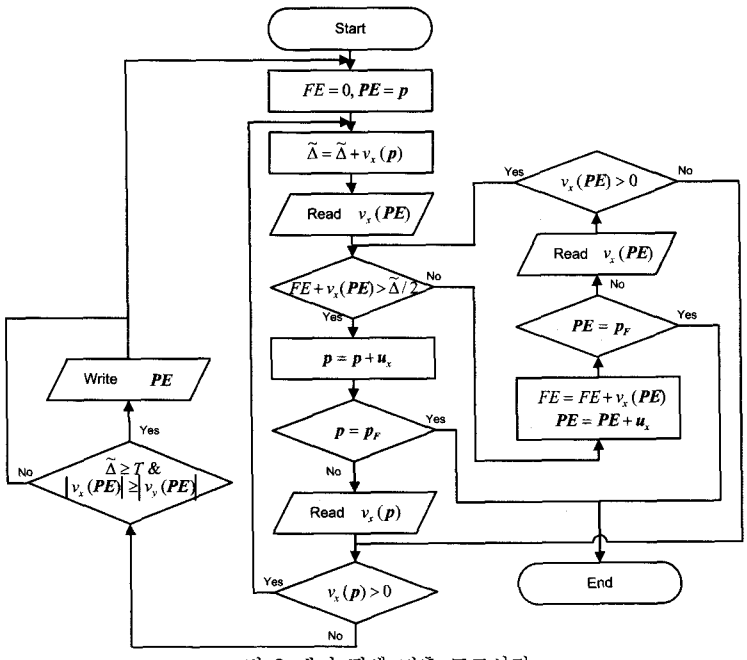


그림 2 에지 픽셀 검출 프로시저

직선을 따라 $\tilde{\Delta}_x$와 $\tilde{\Delta}_y$를 각각 산정하는 것으로 이루어진다. 그림 3은 제안한 에지 검출 알고리즘이다. x방향으로 엄격하게 단조 증가하는 구간에 대하여 에지 픽셀을 검출하기 위하여 적용되는 SIEDPS(Strictly Increasing Edge Detection by Perfect Sharpening) 프로시저를 도입하는데, 이 프로시저는 수평선이 끝나는 픽셀인 $\boldsymbol{p}_F$에서 중단되도록 코딩된다. y방향으로 엄격하게 단조 증가하는 구간에 대해서도 위 프로시저의 x방향을 y방향으로 바꾸어 SIEDPS 프로시저를 적용할 수 있다. 엄격하게 단조 감소하는 구간에 대해서 적용할 SDEDPS (Strictly Decreasing Edge Detection by Perfect Sharpening) 프로시저를 도입할 수 있는데, 이는 SIEDPS 프로시저에서 $v_\theta(\boldsymbol{p})$를 $-v_\theta(\boldsymbol{p})$로 바꿈으로써 간단히 얻어진다.

이미지에서 하나의 수평선 또는 수직선 전체에 대하여 에지 픽셀을 검출하는 알고리즘을 구성하려면 $v_\theta(\boldsymbol{p})>0$와 $v_\theta(\boldsymbol{p})<0$인 픽셀들을 위해서는 각각 SIEDPS와 SIEDPS 프로시저를 서브프로시저로서 결합하고, $v_\theta(\boldsymbol{p})=0$인 픽셀들을 위해서는 출력 없이 지나가는 서브프로시저를 포함해야한다. 그래서 램프의 완전 선명화에 의한 에지 검출(Edge Detection by Perfect Sharpening of Ramps, EDPSR) 알고리즘은 SIEDPS나 SDEDPS 프로시저에 의하여 에지 램프에 걸쳐 밝기 변화가 전체의 절반이 되는 픽셀을 에지 픽셀로 결정하여 출력하는 알고리즘으로 주어진다. 이러한 알고리즘을 이미지의 모든 수평선과 수직선에 걸쳐서 적용함으로써 전체 이미지에 대한 완전한 에지 검출 알고리즘이 구성된다.

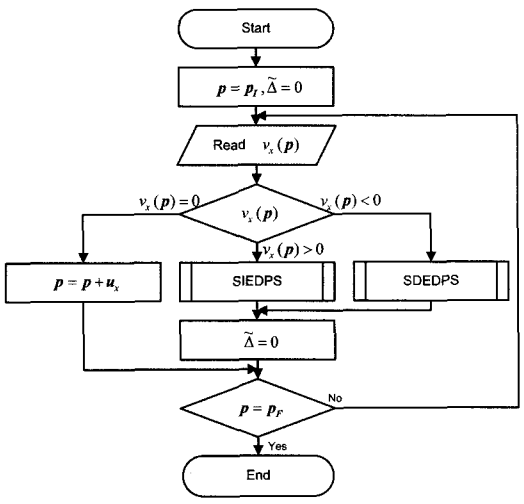


그림 3 에지 검출 알고리즘

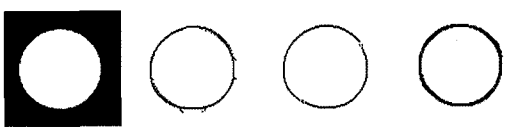
5. 완전 선명화에 의한 에지 검출기 실험 결과

본 논문에서는 제안한 램프의 완전 선명화에 의한 에지 검출 알고리즘을 적용한 시스템을 구현하였다. 구현한 시스템은 Windows의 환경에서 visual C++로 프로그래밍 하였다. 시스템에서는 제안한 알고리즘과 기존 알고리즘과 비교 할 수 있도록 하였으며, 이미지에 대한 정보와 에지 검출 시에 소요되는 시간을 측정함으로써 에지 검출기에 대한 성능평가에 대한 데이타를 제공한다. 기존의 에지 검출 알고리즘으로는 1차 미분 방법인 Sobel과 2차 미분 방법인 Laplacian 그리고 Canny 알고리즘의 결과와 비교하여 실험할 수 있게 구현하였다.

그림 4는 제안한 알고리즘을 원판의 이미지에 적용하였다. 그림 4(b)는 그림 4(a)를 3장에서 소개된 이전 알고리즘에 의한 에지 검출 결과를 보여주는데, x와 y의 두 방향에서 검출한 에지가 이중으로 표시되어 에지 선이 이중으로 겹쳐 있거나 털 같은 것이 나와 있는 것을 볼 수 있다. 본 논문에서 제안한 알고리즘을 적용한 결과인 그림 4(c)에서는 에지 선의 털이 다듬어지고 이중으로 겹쳐진 선이 사라짐을 볼 수 있다. 그림 4(d)는 Canny 알고리즘에 의한 에지 검출 결과를 보여준다. 따라서 MADD $\tilde{\Delta}_x$와 $\tilde{\Delta}_y$의 값에 의한 에지의 확인 결과 중에서 방향 미분의 절대값 $|v_x|$와 $|v_y|$에 따라 배타적으로 하나를 선택하는 방법이 적절하게 이루어졌음을 알 수 있다. 그림 4의 결과에서 제안한 알고리즘의 결과가 Canny 방법의 결과와 비교하여보면 선명하게 에지를 검출 할 수 있는 장점이 있다.

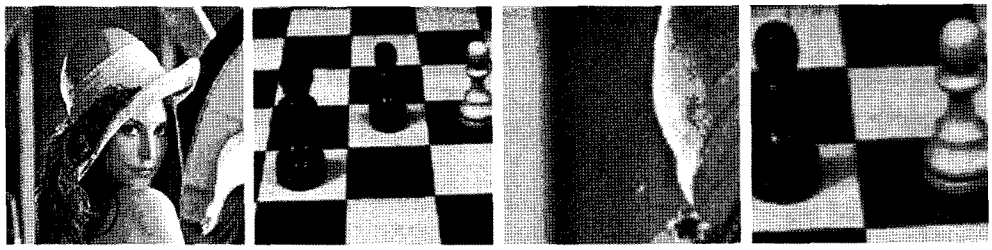
그림 5는 제안한 알고리즘을 실험하기위한 이미지들이다. 그림 5의 (a)와 (b)는 영상처리에서 대표적으로 사용되는 레나와 체스 이미지이고, 그림 5의 (c)와 (d)는 그림 5의 (a)와 (b)의 이미지에서 일부분을 4배 확대하여 얻은 것이다.

그림 6과 7은 그림 5의 (a)와 (b)의 에지 검출 결과이다. 그림 6과 7에서 Sobel 방법은 에지를 두각 시켜 보여주므로 정확한 에지만을 찾기 위해서는 임계값을 주어 후처리를 하여야 한다. Laplacian 방법 또한 Sobel과 마찬가지로 에지를 두각 시켜 보여주며 2차 미분에 의하여 에지의 시작과 끝 부분으로 두 개로 보여준다. 또한 에지의 누락이 많이 있는 단점이 있다. 임계값으로



(a) 원판 이미지 (b) ADD 결과 (c) MADD 결과 (d) Canny결과

그림 4 원판 이미지 에지 검출

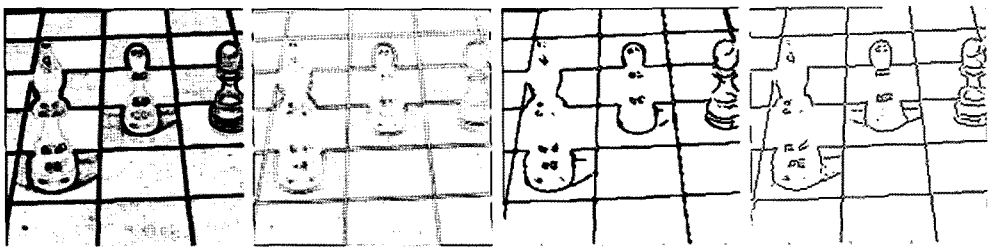


(a) 레나 이미지 (b) 체스 이미지 (c) 레나 확대 이미지 (d) 체스 확대 이미지

그림 5 실험 데이타 이미지

(a) Sobel (b) Laplacian (c) Canny (d) Proposal

그림 6 레나 이미지 결과



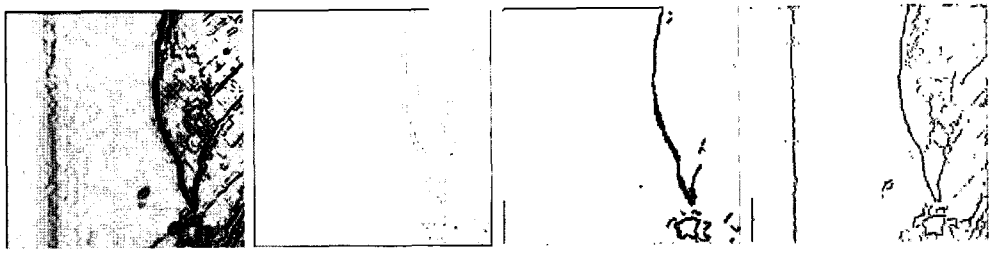
(a) Sobel (b) Laplacian (c) Canny (d) Proposal

그림 7 체스 이미지 결과

105를 사용한 Canny의 알고리즘에 의한 결과는 에지만을 잘 표현해주지만, 낮은 임계값을 초과하는 픽셀들이 같은 램프 내에 속해있다고 하더라도 모두 에지로 표시될 수 있으므로 두꺼운 에지 선이 나타난다. 그러므로 모든 에지 선이 단일 픽셀의 두께를 가져서 정확한 에지의 위치를 나타낼 수 있도록 하려면 Canny 알고리즘에 소모적인 세선화(thinning) 프로시저가 추가로 필요하다. 본 논문에서 $T=25$의 임계값으로 제안한 알고리즘에 의한 에지 검출 결과는 그림 6과 7의 (d)로 보여준다. 이미지로부터 엄격하게 단조적인 밝기 변화 구간을 Canny 알고리즘보다 더 간단한 알고리즘으로 정확한 에지가 검출되었음을 알 수 있다. 또한 모든 에지 선이 단일 픽셀의 두께를 가진 선명한 에지 검출 결과를 확인 할 수 있다.

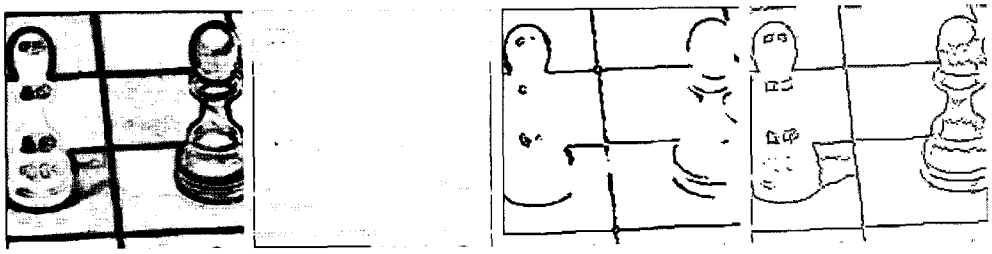
이미지가 길이 스케일로 κ배 확대되면 Sobel 연산자와 같은 국소적 미분은 그 값이 평균적으로 $1/\kappa$배로 변하지만 MADD의 값 $\tilde{\Delta}_\theta$는 변하지 않는다. 그러므로 국소적 미분을 사용하는 Canny 에지 검출기는 확대된 이미지에 대하여 적용할 때에 임계값을 재조정하지 않으면 에지의 일부를 누락하게 된다. 그러나 MADD를 사용하는 제안한 에지 검출기는 확대 등의 스케일링에 상관없이 동일한 효과를 보인다.

그림 8과 9는 그림 5의 (c)와 (d)의 에지검출 결과이다. 그림 8과 9에서 이미지가 확대되면서 에지의 폭이 두껍게 변화하였다. 그림 8과 9에서 Sobel 방법은 잡음이 많아져 에지가 선명하지 못하고 잡음이 많이 발생하였으며, Laplacian 방법은 에지를 단일하게 보여주지 못하며 전체적으로 에지 검출이 잘 되지 않는 결과를 보인다. Canny 방법은 에지의 일부가 누락되어있으며, 에지를 두껍게 검출한다. 본 논문에서 제안한 방법은 기존의 에지 검출 방법에 비하여 세밀하면서 선명하게 에지를 검출 할 수 있다 즉, 국소적 미분 연산자를 사용하는



(a) Sobel (b) Laplacian (c) Canny (d) Proposal

그림 8 레나 확대 이미지 결과



(a) Sobel (b) Laplacian (c) Canny (d) Proposal

그림 9 체스 확대 이미지 결과

에지 검출기는 검출 조건을 적절하게 바꾸지 않으면 이미지를 확대한 후에 에지의 일부를 검출할 수 없게 되지만 제안한 에지 검출기는 동일한 검출 조건에서도 훌륭한 성능을 갖는다.

그림 10은 에지 검출 시에 소요되는 시간을 비교할 수 있는 그래프이다. 동일한 환경에서 기존의 방법과 제안한 방법을 30회의 반복에 의하여 검출 시간을 비교하였다. 기존의 미분연산을 이용한 마스크에 의한 방법인 Sobel과 Laplacian 방법들은 검출 시간은 빠르나 검출 결과 에지만을 보여주지 못하므로 정확한 에지를 검출하기 위해서 추가적인 필터링이 필요하다. Canny 방법은 검출 시간이 많이 소요되면서 에지를 두껍게 검출하므로 선명한 에지 검출을 위해서는 세선화 작업이 필요로 한다. 본 논문에서 제안한 방법은 검출시간이 미분연산을 이용한 마스크에 의한 방법보다 많이 소요되며 Canny 방법보다는 빠르게 검출 하는 것을 확인할 수 있으며 검출된 에지는 모두 단일 픽셀의 두께를 가진 완전 선명한 에지를 검출할 수 있는 장점을 가지고 있다.

그림 11은 제안한 알고리즘을 구현한 에지검출기로 에지 검출을 수행한 화면이다. 원본 이미지와 제안한 방법 그리고 기존의 방법을 비교하여 볼 수 있도록 하였으며, 에지 검출에 소요되는 시간과 정보들을 볼 수 있도록 구현하였다.

6. 결 론

본 논문에서 제안한 알고리즘은 에지의 존재를 확인

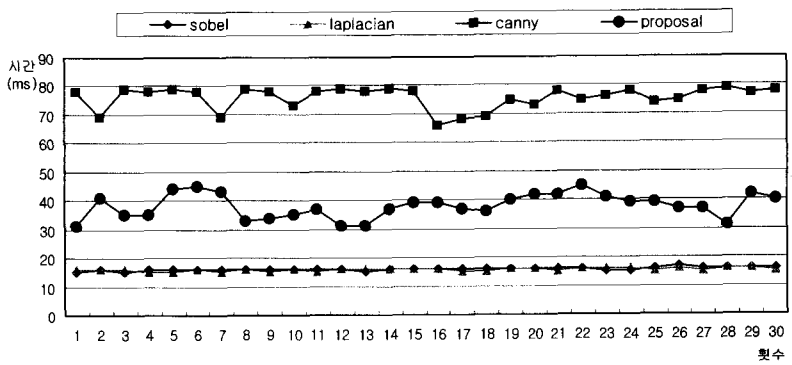


그림 10 에지 검출 시간 비교

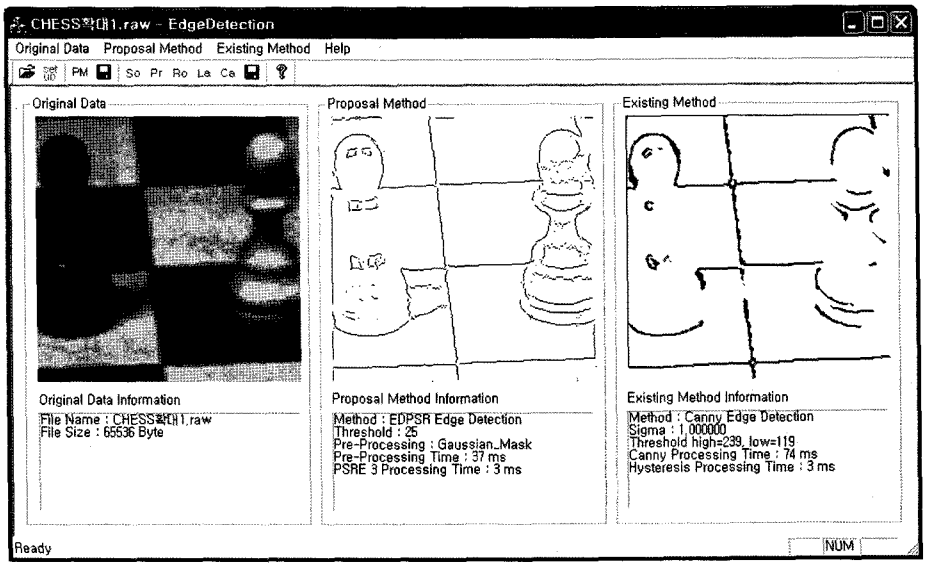


그림 11 제안한 알고리즘으로 구현한 에지검출기

하고 정확한 에지 픽셀의 위치를 결정하기 위하여 MADD의 값인 $\tilde{\Delta}_x(p)$와 $\tilde{\Delta}_y(p)$를 별도로 산정하기만 하면 된다. 그러므로 이 알고리즘은 기울기의 크기를 구하기 위해 제곱근을 계산하는 부동소수점 연산을 포함되고 추가로 세선화 알고리즘까지 포함하는 기존의 알고리즘에 비하여 상대적으로 계산이 단순하다는 장점이 있다. $\tilde{\Delta}_x(p)$와 $\tilde{\Delta}_y(p)$의 연산자는 비국소적이지만, SIEDPS 등의 프로시저에서 설명되었듯이, 한 번의 단방향 스캔을 통해 국소적 연산자인 $v_x(p)$와 $v_y(p)$를 계산함으로써 구할 수 있으므로 추가적인 계산 부담은 거의 없다.

국소적 미분을 사용하는 기존의 에지 검출 알고리즘들은 확대된 이미지에 대하여 적용할 때에 임계값을 재조정하지 않으면 에지의 일부를 누락하거나, 더욱 두꺼운 에지 선을 보여준다. 그러나 MADD를 사용하는 제안한 에지 검출기는 확대 등의 스케일링에 상관없이 단일한 에지를 검출한다. 또한, 처리 속도 면에서도 제안한 에지 검출 알고리즘이 Canny 에지 검출 알고리즘에 비하여 빠름을 확인할 수 있다.

조명의 불균일성으로 인하여 넓은 면의 밝기가 점진적으로 변하게 되면, 밝기 분포에 대한 MADD를 에지 시그널의 특징적 속성으로 사용하기 때문에 넓은 램프의 에지로 잘못 검출될 수도 있다. 이러한 검출 오류를 방지해야 한다면 언샤픈 마스크(unsharp mask) 프로시저 등을 전처리 과정에서 사용할 수도 있지만, 제안한 알고리즘에서는 검출되는 엄격하게 단조적인 구간의 폭을 제한함으로써 처리될 수 있다.

참 고 문 헌

[1] Dana H. Ballard and Christopher M. Brown, Computer Vision, p. 539, Prentice Hall, 1982.

[2] E. M. Kim and C. S. Pahk, "Strict Monotone of an Edge Intensity Profile and a New Edge Detection Algorithm," LNCS 2690: Intelligent Data Engineering and Automated Learning, pp. 975-982, 2003.

[3] D. Marr and E. Hildreth, "Theory of Edge Detection," Proceedings of the Royal Society London 207, pp. 187-217, 1980.

[4] J. Canny, "A Computational Approach to Edge Detection," IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.8, pp. 679-698, 1986.

[5] R. A. Boie and I. Cox, "Two Dimensional Optimum Edge Recognition using Matched and Wiener Filters for Machine Vision," Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 450-456, 1987.

[6] R. J. Qian and T. S. Huang, "Optimal Edge Detection in Two-Dimensional Images," IEEE Trans. Image Processing, Vol.5, No.7, pp. 1215-1220, 1996.

[7] Z. Wang, K. R. Rao and J. Ben-Arie, "Optimal Ramp Edge Detection Using Expansion Matching," IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.18, No.11, pp. 1586-1592, 1996.

[8] J. R. Parker, Algorithms for Image Processing and Computer Vision, p.432, Wiley Computer Publishing, 1997.

[9] M. Seul, L. O'Gorman and M. J. Sammon, Practical Algorithms for Image Analysis, p. 295, Cambridge University Press, 2000.

[10] R. Crane, A Simplified Approach to Image Processing, p. 336, Prentice Hall, 1996.
[11] A. K. Jain, Fundamentals of Digital Image Processing, p. 569, PEARSON, 2003.
[12] 조용현, 디지털 영상처리 실무, p. 243, 인터비전, 2005.
[13] 최형일, 이근수, 이양원, 영상처리 이론과 실제, p. 369, 홍릉과학출판사, 1999.
[14] 이문호, Visual C++ 실용 영상 신호처리, p. 294, 대영사, 2001.

이 종 구
1996년 호원대학교 전자계산학과 졸업(이학사). 1998년 전북대학교 대학원 전산통계학과 졸업(이학석사). 1998년~현재 전북대학교 대학원 전산통계학과 박사과정. 관심분야는 비디오정보검색, HCI, 컴퓨터그래픽스, 이미지프로세싱 등

유 철 중
정보과학회논문지 : 소프트웨어 및 응용 제 34 권 제 9 호 참조

장 옥 배
정보과학회논문지 : 소프트웨어 및 응용 제 34 권 제 9 호 참조