

잡음영상에서 로버스트 순위-순서 검정을 이용한 효과적인 에지검출*

임동훈¹⁾

요약

에지검출은 컴퓨터비전과 영상처리시스템에서 널리 사용되는 단계이다. 본 논문에서는 잡음영상에서 효율적인 에지검출을 위해 이표본 위치 문제에서 윌콕슨 검정의 대안인 로버스트 순위-순서 검정에 기초한 새로운 검출법을 제안하였다. 제안된 방법은 δ -에지모형하에서 5×5 윈도우의 부분 픽셀만으로 구성된 근방영역간에 통계적으로 유의한 차이가 있는지를 조사하였다. 제안된 에지 검출법의 성능을 평가하기 위해 실제영상과 인조영상을 가지고 영상실험을 통하여 얻은 에지맵과 객관적인 척도하에서 양적으로 비교 분석하였다.

주요용어: 에지검출, 로버스트 순위-순서 검정, 잡음영상, 윌콕슨 방법, T 방법, Canny 방법.

1. 서론

영상에서 에지(edge)는 영상 안에서 영역의 경계를 나타내는 특징으로 픽셀의 밝기가 갑작스럽게 변하는 부분을 나타낸다. 에지검출(edge detection)을 통하여 물체의 위치, 모양, 크기, 표면의 무늬 등에 대한 정보를 얻을 수 있다. 어린 시절 동전 백 원을 종이 밑에 놓고 연필로 긁으면 종이 위에 대략적인 백 원 모양인 할아버지 얼굴이 나타났다. 우리는 이처럼 윤곽선만으로 물체의 위치나 모양, 크기 등을 알 수 있다.

에지검출은 컴퓨터 비전과 영상처리시스템에서 가장 중요한 단계이다. 정확한 에지검출은 영상 시스템의 성능을 평가하는데 결정적인 요인이다.

지금까지 에지 검출은 주로 미분 연산자를 이용한 수학적 방법들에 의해 이루어져왔다. 여기에는 Roberts, Prewitt, Sobel, Laplacian, LoG(Laplacian of Gaussian) 방법 등이 있다. 그러나, 이 방법 모두 잡음에 민감하게 반응하는 단점을 갖고 있다(Gonzalez와 Woods, 1993).

최근에는 에지 검출을 위한 통계적인 방법들에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. Bovik 등(1986)은 잡음영상(noisy images)에서 이표본 선형 순위 검정법(two-sample linear rank tests)에 기초한 에지검출법을 제안하였다. 이 방법은 두개의 인접한 3×3 윈도우상에서 4방

* 이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2006-521-C00042)

1) (660-701) 경남 진주시 가좌동 900, 경상대학교 정보통계학과 교수 및 RINS, RICIC
E-mail: dhlm@gnu.ac.kr

향의 에지검출을 위해 설계하였으며 객관적인 척도를 가지고 에지검출법들의 성능을 양적으로 평가하지 않았다. Fesharaki와 Hellestrand(1994)은 5×5 윈도우상에서 스튜던트 T 검정을 사용하여 에지를 검출하였다. 임동훈과 박은희(2001) 과 Lim과 Jang(2002)은 Bovik 등(1986)과 같은 윈도우를 가지고 이표본 문제(two-sample problem)에서 여러가지 검정법들을 에지검출에 적용하였고 에지검출법들의 성능을 양적으로 평가하였다. Lim(2006)은 5×5 윈도우상에서 로버스트 순위-순서 검정(robust rank-order test)을 이용하여 에지검출을 하였다. 이 방법은 여러 방향의 에지검출은 가능하나 에지검출하는데 많은 시간이 소요됨을 알 수 있었다.

본 논문에서는 잡음영상에서 로버스트 순위-순서 검정에 기초한 효율적인 에지검출법을 제안하고자 한다. 이를 위해 δ -에지모형하에서 5×5 윈도우의 부분 픽셀만으로 구성된 근방영역간에 통계적으로 유의한 차이가 있는지를 조사하고자 한다. 로버스트 순위-순서 검정은 두 모집단의 분포가 같지 않은 Behrens-Fisher 문제에서 위치모수간의 검정하는데 윌콕슨 검정의 대안으로 널리 사용되고 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 제 2절에서는 에지검출을 위한 δ -에지모형하에서 로버스트 순위-순서 검정법을 묘사하고 제 3절에서는 영상실험을 통하여 제안된 로버스트 순위-순서 방법과 윌콕슨 방법, T 방법, Lim(2006) 방법 그리고 잘 알려진 Canny(1986) 방법과의 에지검출 성능을 비교하고자 한다. 그리고 제 4절에서 본 논문의 결론을 맺는다.

2. δ -에지모형을 이용한 로버스트 순위-순서 검정

우리는 $n \times n$ 윈도우에서 중심픽셀의 에지여부를 인접한 2개 근방영역간의 픽셀값들의 변화를 조사함으로써 결정하고자 한다. 그림 2.1은 서로 다른 8 방향 에지를 검출하기 위한 두 영역의 픽셀크기가 각각 10인 5×5 윈도우들이다. 짙은 검은색 픽셀이 관심이 있는 중심픽셀이고 옅은 검은색 픽셀들이 조사대상인 근방영역을 나타낸다. 참고로 Lim(2006)은 중심픽셀을 제외한 픽셀크기가 12인 똑같은 영역으로 분할되는 5×5 윈도우를 사용하였다. 본 논문에서는 그림 2.1(a)에 있는 수직 방향의 에지 검출하는 방법에 대해 논의하고 최종적인 에지는 각 방향의 에지들의 논리합(OR) 연산을 수행함으로써 얻어진다. 그림 2.1(a)에서 왼쪽 근방영역을 $\mathbf{X} = \{X_1, \dots, X_m\}$ 그리고 오른쪽 근방영역을 $\mathbf{Y} = \{Y_1, \dots, Y_n\}$ 이라 하고 X_1, \dots, X_m 과 Y_1, \dots, Y_n 은 서로 독립이고 각각 연속분포 $F(x - \mu_x)$ 와 $G(y - \mu_y)$ 로 부터 확률표본이라 하자. 여기서 μ_x 와 μ_y 은 위치모수이다. 에지-높이 모수(edge-height parameter) δ 를 사용한 에지 모형은 다음과 같다.

$$A_i = \begin{cases} X_i + \delta; & X_i \in \mathbf{X} \\ Y_i & ; Y_i \in \mathbf{Y} \end{cases}$$

그리고

$$B_i = \begin{cases} X_i - \delta; & X_i \in \mathbf{X} \\ Y_i & ; Y_i \in \mathbf{Y}, \end{cases}$$

여기서 δ 는 두 영역간 픽셀값의 차이가 크지 않은 경우 에지로 잘못 판정하는 것을 막

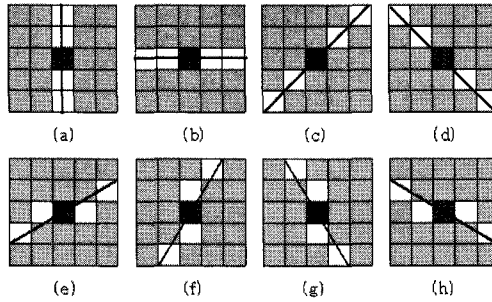


그림 2.1: 8 방향 에지검출을 위한 5×5 윈도우들: (a) 수직방향 (b) 수평방향 (c) 45° 방향 (d) 135° 방향 (e) 22.5° 방향 (f) 67.5° 방향 (g) 112.5° 방향 (h) 167.5° 방향

기 위해 사용되는 모수이다. 그러면 δ -수정된 픽셀값 $\{A_i\}$ 와 $\{B_i\}$ 에 대해 다음과 같이 가설을 세운다.

$$H_0^\uparrow : \mu_x + \delta \geq \mu_y \text{ versus } H_1^\uparrow : \mu_x + \delta < \mu_y$$

그리고

$$H_0^\downarrow : \mu_x - \delta \leq \mu_y \text{ versus } H_1^\downarrow : \mu_x - \delta > \mu_y.$$

먼저, δ -수정된 표본 $\{A_i\}$ 에서 H_0^\uparrow versus H_1^\uparrow 를 검정하기 위한 로버스트 순위-순서 검정 통계량은 다음과 같이 얻어진다. 표본 $X_i + \delta$, $X_i \in \mathbf{X}$ 에 대한 placement $U(Y, X_i + \delta)$ 을 Y_i , $Y_i \in \mathbf{Y}$ 중에서 $X_i + \delta$ 보다 작은 표본의 개수라 할 때 $U(Y, X_i + \delta)$ 의 평균(mean)은 다음과 같다.

$$U(Y, X + \delta) = \sum_{i=1}^m U(Y, X_i + \delta) / m.$$

위와 같은 방법으로 표본 Y_i , $Y_i \in \mathbf{Y}$ 에 대한 placement $U(X + \delta, Y_i)$ 을 $X_i + \delta$, $X_i \in \mathbf{X}$ 중에서 Y_i 보다 작은 표본의 개수라 할 때 $U(X + \delta, Y_i)$ 의 평균은 다음과 같다.

$$U(X + \delta, Y) = \sum_{i=1}^n U(X + \delta, Y_i) / n.$$

다음은 $U(Y, X_i + \delta)$ 와 $U(X + \delta, Y_i)$ 의 variability의 인덱스(index)를 각각 $V_{x+\delta}$ 와 $V_{y+\delta}$ 라 할 때 다음과 같이 정의한다.

$$V_{x+\delta} = \sum_{i=1}^m [U(Y, X_i + \delta) - U(Y, X + \delta)]^2 \text{ 그리고 } V_{y+\delta} = \sum_{i=1}^n [U(X + \delta, Y_i) - U(X + \delta, Y)]^2.$$

따라서, H_0^\uparrow 을 검정하기 위한 통계량은 다음과 같다.

$$U_A = \frac{n \cdot U(X + \delta, Y) - m \cdot U(Y, X + \delta)}{2\sqrt{V_{x+\delta} + V_{y+\delta} + U(Y, X + \delta) \cdot U(X + \delta, Y)}}.$$

다음은 δ -수정된 표본 $\{B_i\}$ 에서 H_0^\dagger versus H_1^\dagger 을 검정하기 위한 로버스트 순위-순서 검정 통계량은 다음과 같이 얻어진다. 표본 $X_i - \delta, X_i \in \mathbf{X}$ 에 대한 placement $U(Y, X_i - \delta)$ 을 $Y_i, Y_i \in \mathbf{Y}$ 중에서 $X_i - \delta$ 보다 작은 표본의 개수라 할 때 $U(Y, X_i - \delta)$ 의 평균은 다음과 같다.

$$U(Y, X - \delta) = \sum_{i=1}^m U(Y, X_i - \delta)/m.$$

똑같은 방법으로 표본 $Y_i, Y_i \in \mathbf{Y}$ 에 대한 placement $U(X - \delta, Y_i)$ 을 $X_i - \delta, X_i \in \mathbf{X}$ 중에서 Y_i 보다 작은 표본의 개수라 할 때 $U(X - \delta, Y_i)$ 의 평균은 다음과 같다.

$$U(X - \delta, Y) = \sum_{i=1}^n U(X - \delta, Y_i)/n.$$

그리고 $U(Y, X_i - \delta)$ 와 $U(X - \delta, Y_i)$ 의 variability의 인덱스를 각각 $V_{x-\delta}$ 와 $V_{y-\delta}$ 라 할 때 다음과 같다.

$$V_{x-\delta} = \sum_{i=1}^m [U(Y, X_i - \delta) - U(Y, X - \delta)]^2 \quad \text{그리고} \quad V_{y-\delta} = \sum_{i=1}^n [U(X - \delta, Y_i) - U(X - \delta, Y)]^2$$

따라서 H_0^\dagger 을 검정하기 위한 통계량은 다음과 같다.

$$U_B = \frac{m \cdot U(Y, X - \delta) - n \cdot U(X - \delta, Y)}{2\sqrt{V_{x-\delta} + V_{y-\delta} + U(Y, X - \delta) \cdot U(X - \delta, Y)}}.$$

우리는 H_0^\dagger (혹은 H_1^\dagger)을 검정하기 위한 검정 통계량은 다음과 같다.

$$U^* = \max(U_A, U_B).$$

검정 통계량 U^* 는 U_A 와 U_B 들 중의 최대값이므로 유의수준 α 에서 $U^* \geq u_\alpha$ 이면 $U_A \geq u_\alpha$ 혹은 $U_B \geq u_\alpha$ 이므로 귀무가설 H_0^\dagger 혹은 H_1^\dagger 을 기각하여 주어진 중심픽셀에 에지가 존재한다고 결론을 내린다. 여기서, 기각치 u_α 는 Fligner와 Pollicello(1981), Siegel과 Castellan(1988) 그리고 Feltovich(2003)에 주어져 있다.

3. 에지 성능 실험 및 논의사항

본 절에서는 제 2절에서 논의한 로버스트 순위-순서 검정을 이용한 에지검출 방법의 성능을 평가하기 위해 윌콕슨 방법, T 방법, Lim(2006) 방법 그리고 Canny(1996) 방법들과 에지검출력을 비교하고자 한다. 여기에 윌콕슨 방법과 T 방법은 그림 2.1의 윈도우상에 윌콕슨 순위합 검정과 스튜던트 T 검정을 적용한 방법들이다. 성능실험에 사용된 영상은 5가지 실제 영상과 인조영상을 가지고 실험을 한다. 표 3.1에 주어진 여러 가지 잡음을 추가하여 잡음영상을 얻는다. 가우시안 잡음(Gaussian noise) 영상은 평균이 0이고 주어진 표준편차를 갖는 잡음을 원상에 추가하여 얻고 임펄스 잡음(impulse noise) 영상은 픽셀값이

50과 200을 갖는 잡음을 주어진 발생확률로 원영상에 추가하여 얻는다. 가우시안 잡음의 폭(amplitude)은 Lyvers 등(1989)의 신호대잡음비(signal-to-noise ratio, SNR)

$$SNR = 20\log(40/\sigma)$$

로 나타내며 여기서 40은 에지 높이이고 σ 는 추가된 잡음의 표준 편차이다.

표 3.1: 실험에 사용된 여러가지 잡음

잡음	잡음 형태	발생확률	SNR (표준편차)
G20	가우시안		20 dB (4.0)
G15	가우시안		15 dB (7.11)
G10	가우시안		10 dB (12.65)
I0.1	임펄스	0.1	
I0.2	임펄스	0.2	

3.1. 정량적인 성능비교

에지검출법들의 양적인 성능비교를 위해 그림 3.1의 인조영상을 가지고 실험한다. 인조 영상은 픽셀값이 115인 어두운 배경에 대해 픽셀값이 155인 밝은 원 영역으로 구성된 128×128 크기의 영상이다. 에지검출력에 대한 객관적인 척도로서 다음의 Figure of merit(PFOM)를 사용한다(Pratt, 1978).

$$R = \frac{1}{I_N} \sum_{i=1}^{I_A} \frac{1}{1 + \beta d_i^2}$$

여기서 I_N 은 I_I, I_A 중 최대값이며 I_I 와 I_A 은 각각 실제 에지수와 검출된 에지수이다. 그리고 d_i 는 잘못 검출된 i 번째 에지점이 실제 에지점과의 거리이고 β 는 스케일 상수인데 우리 실험에서는 1로 하였다.

에지검출법들에 대한 임계값은 통계적 방법들에 대해서는 유의수준 $\alpha = 0.05$ 에서 검정하였고 Canny 방법은 여러가지 임계값 중에서 PFOM을 최대로 하는 임계값을 사용하였다.

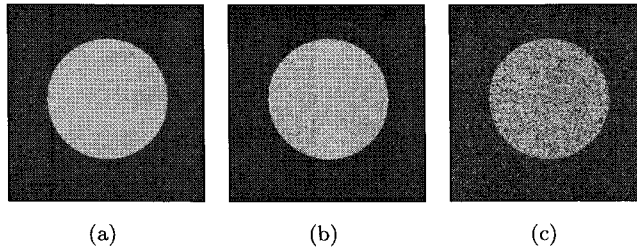


그림 3.1: 인조영상: (a) 잡음없는 원영상 (b) G15 잡음 영상 (c) I0.2 잡음 영상

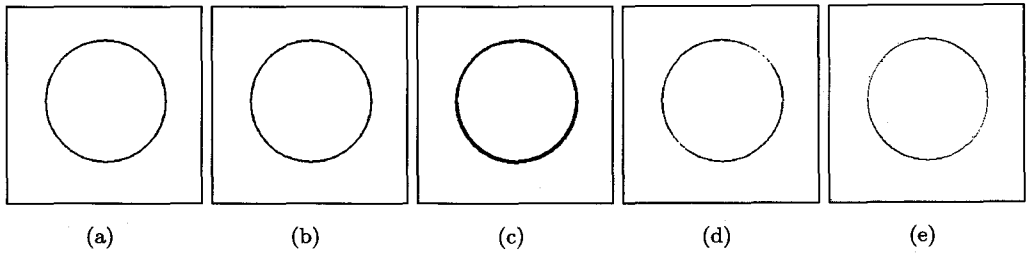


그림 3.2: 그림 3.1(b)의 인조영상에 적용하여 얻은 에지검출: (a)로버스트 순위-순서 방법 (b) 윌콕슨 방법 (c) T 방법 (d) Lim 방법 (e) Canny 방법

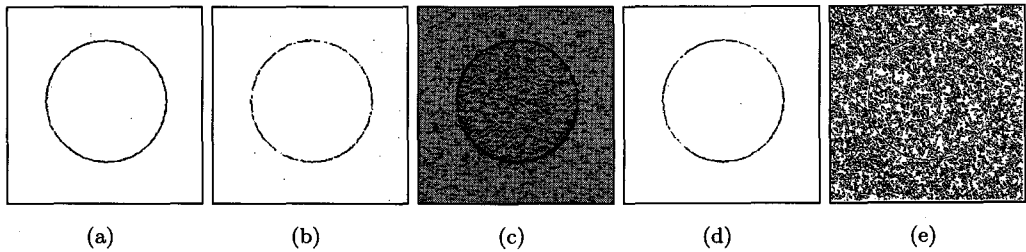


그림 3.3: 그림 3.1(c)의 인조영상에 적용하여 얻은 에지검출: (a)로버스트 순위-순서 방법 (b) 윌콕슨 방법 (c) T 방법 (d) Lim 방법 (e) Canny 방법

그림 3.2와 그림 3.3은 그림 3.1(b)와 3.1(c)의 가우시안 잡음영상과 임펄스 잡음영상에 대한 에지검출 결과들이다. 그림 3.2는 실험에 사용된 모든 방법들은 $SNR = 15$ 인 가우시안 잡음영상에 대해서는 좋은 에지 검출력을 보여주고 있다. 여기서 그림 3.2 (c)의 T 방법은 다른 방법에 비해 에지를 진하게 검출하고 있다. 그림 3.3은 제안된 로버스트 순위-순서 방법을 포함한 비모수적 방법들은 임펄스 잡음 영상에서도 좋은 검출력을 유지하는 반면에 T 방법과 Canny 방법은 에지와 잡음을 구별못함을 알 수 있다.

표 3.2는 $\delta = 10, 15$ 그리고 20인 경우 잡음분포에 따라 에지검출법들의 PFOM를 나타내고 있다. 이 표로부터 제안된 방법은 잡음형태에 관계없이 윌콕슨 방법, T 방법 그리고 Canny 방법에 비해 좋은 성능을 갖고 있으며 Lim 방법과 비교했을때 가우시안 잡음 영상에서는 비슷한 결과를 보이나 임펄스 잡음 영상에서는 훨씬 좋은 성능을 보여주고 있다. 여기서 T 방법과 Canny 방법은 임펄스 잡음영상에서 PFOM의 값이 약 0.3이하로 급격하게 떨어짐을 알 수 있다.

3.2. 정성적인 성능비교

우리는 그림 3.4에 있는 5가지 실제 영상들을 가지고 실험하였다. 그림 3.5는 그림 3.4의 잡음없는 영상들에 대해 표 3.1의 여러가지 잡음을 추가하여 얻은 잡음영상들이다. 그림 3.6, 3.7 그리고 3.8는 그림 3.5(a), 3.5(c) 그리고 3.5(d)의 영상들에 대한 에지검출 결과들이다. 여기서 그림 3.5(b)와 3.5(e)에 대한 결과는 지면관계상 수록하지 않았다. 먼저 그림

표 3.2: 에지 검출법들의 PFOM

잡음	δ	에지 검출법				
		로버스트 순위-순서	윌콕슨	T	Lim	Canny
G20	10	0.992	0.795	0.815	0.993	
	15	0.994	0.806	0.902	0.993	0.757
	20	0.995	0.808	0.948	0.993	
G15	10	0.952	0.752	0.797	0.983	
	15	0.987	0.788	0.891	0.993	0.758
	20	0.994	0.803	0.944	0.994	
G10	10	0.753	0.608	0.419	0.851	
	15	0.937	0.756	0.780	0.973	0.757
	20	0.981	0.804	0.918	0.893	
I0.1	10	0.989	0.787	0.169	0.901	
	15	0.989	0.787	0.284	0.901	0.271
	20	0.989	0.787	0.350	0.901	
I0.2	10	0.966	0.780	0.096	0.717	
	15	0.966	0.780	0.139	0.717	0.163
	20	0.966	0.780	0.156	0.717	

3.6는 모든 방법들이 잡음이 얇은 가우시안 잡음영상에 대해서는 에지를 잘 검출하고 있고 그림 3.7에서는 3개의 비모수적 방법들은 비슷한 결과를 보이는 반면에 T 방법은 잡음이 많은 가우시안 영상에서 약간의 잡음이 검출하고 있고 Canny 방법은 많은 잡음과 흐릿한 에지를 보여주고 있다. 그림 3.8에서는 3개의 비모수적 방법들은 여전히 좋은 결과를 보이는 반면 T 방법은 임펄스 잡음 영상에서 잡음과 에지 구분이 불분명하게 검출하고 있고 Canny 방법은 많은 잡음으로 인해 에지가 보이지 않고 있다.

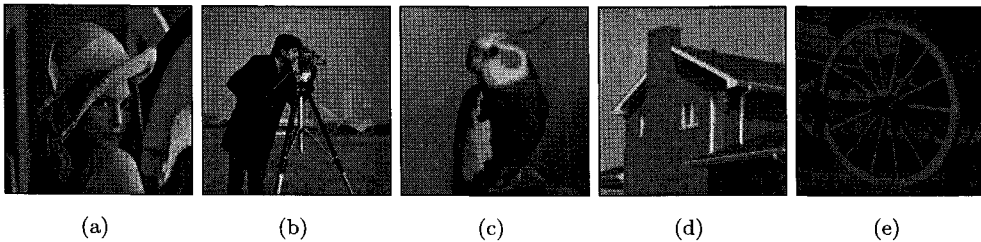


그림 3.4: 실험에 사용된 실제 영상: (a) Lenna 영상 (b) camera 영상 (c) bird 영상 (d) house 영상 (e) wheel 영상

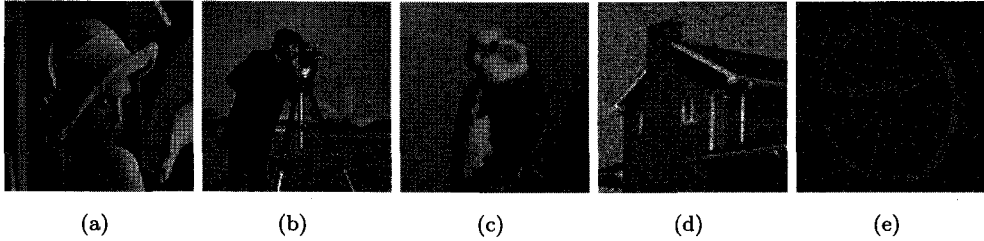


그림 3.5: 실험에 사용된 잡음이 추가된 실제 영상 : (a) G20인 Lenna 잡음 영상 (b) G15인 camera 잡음 영상 (c) G10인 bird 잡음 영상 (d) I10인 house 잡음 영상 (e) I20인 wheel 잡음 영상



그림 3.6: 그림 3.5(a)에 적용하여 얻은 에지검출: (a) 로버스트 순위-순서 방법 (b) 윌콕슨 방법 (c) T 방법 (d) Lim 방법 (e) Canny 방법

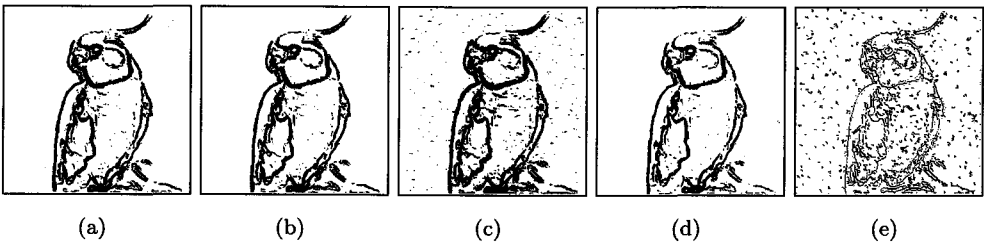


그림 3.7: 그림 3.5(c)에 적용하여 얻은 에지검출: (a) 로버스트 순위-순서 방법 (b) 윌콕슨 방법 (c) T 방법 (d) Lim 방법 (e) Canny 방법

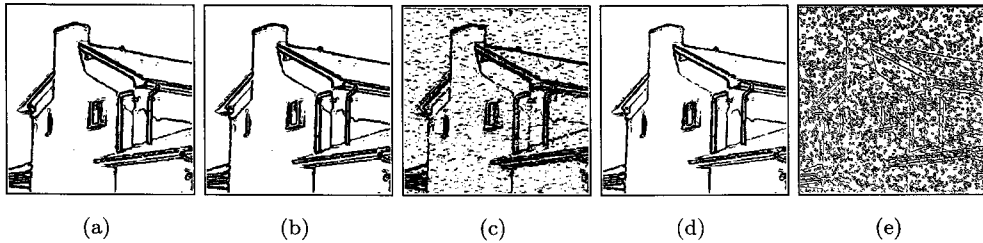


그림 3.8: 그림 3.5(d)에 적용하여 얻은 에지검출: (a) 로버스트 순위-순서 방법 (b) 윌콕슨 방법 (c) T 방법 (d) Lim 방법 (e) Canny 방법

4. 결론

본 논문에서는 잡음영상에서 효율적인 에지검출을 위해 이표본 위치 문제에서 윌콕슨 검정의 대안인 로버스트 순위-순서 검정에 기초한 새로운 검출법을 제안하였다. 제안된 방법은 δ -에지모형하에서 5×5 윈도우의 부분 픽셀만으로 구성된 근방영역간에 통계적으로 유의한 차이가 있는지를 조사하였다. 본 논문에서 윈도우의 근방영역의 크기와 형태는 δ -에지모형과함께 에지검출 성능을 좌우하는 중요한 요인이야. 근방영역의 크기는 에지검출하는 수행시간을 결정하고 형태는 에지방향을 결정한야. 여기서는 작은 근방영역의 크기를 가지고 여러 방향의 에지를 검출하기 위해 설계하였다.

제안된 에지 검출법의 성능을 평가하기 위해 실제영상과 인조영상을 가지고 영상실험을 통하여 얻은 에지맵과 객관적인 척도하에서 양적으로 비교 분석하였다. 영상실험결과 인조영상에서 제안된 로버스트 순위-순서 방법은 잡음형태에 관계없이 윌콕슨 방법, T 방법 그리고 Canny 방법에 비해 좋은 성능을 갖고 있으며 Lim 방법과 비교했을때 가우시안 잡음 영상에서는 비슷한 결과를 보이나 임펄스 잡음 영상에서는 훨씬 좋은 성능을 보임을 알 수 있었다. 실제영상에 대한 실험에서 제안된 방법은 여전히 좋은 결과를 보이는 반면 T 방법과 Canny 방법은 임펄스 잡음에 민감하게 반응하여 잡음과 에지가 혼재한 모습을 보여주고 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

- 임동훈, 박은희 (2001). 잡음영상에서 에지검출을 위한 이표본 검정법, <응용통계연구>, 14, 149-160.
- Bovik, A. C., Huang, T. S. and Munson, D. C. (1986). Nonparametric tests for edge detection in noise, *Pattern Recognition*, 19, 209-219.
- Canny, J. (1986). A computational approach to edge detection, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 8, 679-698.
- Feltovich, N. (2003). Nonparametric tests of differences in medians: comparison of the Wilcoxon-Mann-Whitney and robust rank-order tests, *Experimental Economics*, 6, 273-297.

- Fesharaki, M. N. and Hellestrand, G. R. (1994). A New Edge Detection Algorithm Based on a Statistical Approach, *In Proceeding, Speech, Image Processing and Neural Networks*, Hong Kong, 1, 21-24.
- Fligner, M. A. and Pollicello, G. E. (1981). Robust rank procedures for the Behrens-Fisher problem, *Journal of the American Statistical Association*, **76**, 162-168.
- Gonzalez, R. C. and Woods, R. E. (1993). *Digital Image Processing*, Addison-Wesley Publishing company.
- Lim, D. H. (2006). Robust edge detection in noisy images, *Computational Statistics & Data Analysis*, **50**, 803-812.
- Lim, D. H. and Jang, S. J. (2002). Comparison of two-sample tests for edge detection in noisy images, *Journal of the Royal Statistical Society, Ser. D, -The Statistician*, **51**, 21-30.
- Lyvers, E. P., Mitchell, O. R., Akey, M. L. and Reeves, A. P. (1989). Subpixel measurements using a moment-based edge operator, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **11**, 1293-1309.
- Pratt, W. (1978). *Digital Image Processing*, John Wiley & Sons.
- Siegel, S. and Castellan, N. J. (1988). *Nonparametric Statistics for the Behavioral Sciences*, McGraw-Hill Humanities, New York.

[2006년 10월 접수, 2006년 11월 채택]

Efficient Edge Detection in Noisy Images using Robust Rank-Order Test*

Dong Hoon Lim¹⁾

ABSTRACT

Edge detection has been widely used in computer vision and image processing. We describe a new edge detector based on the robust rank-order test which is a useful alternative to Wilcoxon test. Our method is based on detecting pixel intensity changes between two neighborhoods with a $r \times r$ window using an edge-height model to perform effectively on noisy images.

Some experiments of our robust rank-order detector with several existing edge detectors are carried out on both synthetic images and real images with and without noise.

Keywords: Edge detection, robust rank-order test, noisy images, Wilcoxon detector, T detector, Canny detector.

* This work was supported by Korean Research Foundation Grant funded by the Korean Government(MOEHRD). (KRF-2006-521-C00042)

1) Professor, Department of Information Statistics and RINS, RICIC, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea

E-mail: dhlim@gnu.ac.kr