

잡음영상에서 효과적인 에지검출을 위한 이표본 선형 순위 검정법

임 동 훈*

Two-sample Linear Rank Tests for Efficient Edge Detection in Noisy Images

Dong Hoon Lim*

요 약

본 논문에서는 잡음영상에서 효과적인 에지검출을 위해 이표본 위치문제(two-sample location problem)에서 잘 알려진 선형 순위 검정법(linear rank test)인 Wilcoxon 검정법, Median 검정법 그리고 Van der Waerden 검정법을 적용하고자 한다. 에지 존재 유무는 에지-높이 모수(edge-height parameter)를 사용한 모형 하에서 인접한 두 개의 근방영역간의 평균 차이를 검정함으로써 통계적으로 결정한다. 여기서 근방영역의 크기와 형태는 에지검출을 위한 계산 속도와 에지방향을 고려하여 적응성 있게(adaptively) 결정하였다. 통계적 방법들의 에지검출 성능을 평가하기 위해 자연영상(natural images)과 인조영상(synthetic images) 그리고 잡음이 추가된 영상에 대해 실험을 실시하고 비교분석하였다.

Abstract

In this paper we propose Wilcoxon test, Median test and Van der Waerden test such as linear rank tests in two-sample location problem for detecting edges effectively in noisy images. These methods are based on detecting image intensity changes between two pixel neighborhoods using an edge-height model to perform effectively on noisy images. The neighborhood size used here is small and its shape is varied adaptively according to edge orientations. We compare and analysis the performance of these statistical edge detectors on both natural images and synthetic images with and without noise.

▶ Keyword : Edge detection, Two-sample linear rank tests, Noisy images, Wilcoxon test, Median test, Van der Waerden test.

• 제1저자 : 임동훈
• 접수일 : 2006.07.06, 심사일 : 2006.08.14, 심사완료일 : 2006.09.20
* 경상대학교 정보통계학과 교수

1. 서론

에지검출(edge detection)은 컴퓨터 비전(computer vision)과 영상이해 시스템(image understanding system)에서 가장 중요한 단계이다. 정확한 에지검출은 영상 시스템의 성능을 평가하는데 결정적인 요인이 된다.

기존의 에지검출법들은 주로 잡음이 없는 단순한 영상에 대해서는 효과적이거나 잡음영상에 대해서는 잡음과 에지를 구별 못하는 경향이 있다 [1][2][3].

본 논문에서는 이표본 위치문제(two-sample location problem)에서 선형 순위 검정법(linear rank tests)인 Wilcoxon 검정법, Median 검정법 그리고 Van der Waerden 검정법을 이용하여 에지를 검출하고자 한다. 여기서 이표본 위치문제란 두개의 모집단에서 모평균 차이에 대한 검정문제를 의미한다. 제안된 에지검출법에서 에지유무는 잡음영상에서 잡음에 덜 민감하게 반응하기 위해 에지-높이 모수(edge-height parameter)를 포함한 새로운 모형 하에서 인접한 두 개의 근방영역간의 평균 차이를 검정함으로써 통계적으로 결정한다. 여기서 근방영역의 크기는 에지검출을 위한 계산 속도를 고려하여 가능한 작은 윈도우를 선택하고 근방영역의 형태는 에지방향을 따라 적응성 있게 (adaptively) 결정한다.

제 II 절에서 이표본 선형 순위 검정법에 대해 논의하고 영상의 에지검출에 적용한다. 제 III 절에서는 에지검출법들의 에지 검출 성능을 자연영상(natural images), 인조영상(synthetic images) 그리고 잡음이 추가된 잡음영상에 대해 비교분석하고 제 IV 절에서 결론 및 향후 연구내용에 대해 기술한다.

II. 에지검출을 위한 이표본 선형 순위 검정법

우리는 에지를 검출하기 위해 그림 1과 같은 인접한 두 개의 근방영역을 생각한다. 근방영역의 크기는 에지검출하는데 계산시간을 줄이기 위해 $n=6$ 인 작은 윈도우를 생각하였고 근방영역의 형태는 검출하고자 하는 에지방향에 따라 결정하였는데 수직과 수평방향의 에지검출을 위해 직사각형, 45° 방향과 135° 방향의 에지검출을 위해 삼각형을 생각하였다. 그림 1에서 검은색 픽셀이 관심있는 에지가

후보이고 흰색 픽셀들로 이루어진 윈도우가 근방영역을 나타낸다.

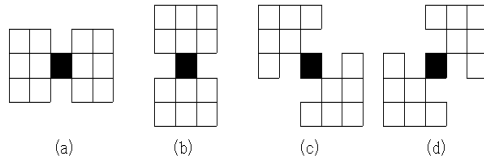


그림 1. (a) 수직 (b) 수평 (c) 45° (d) 135° 방향 에지를 검출하기 위한 두 개의 근방영역

Fig 1. Windowing configurations for detecting (a) vertical edge (b) horizontal edge (c) 45° edge (d) 135° edge.

참고로, Bovik *et al.*[4] 과 Lim and Jang[5]은 인접한 두 개의 3×3 윈도우를 사용하였고 Lim[6]은 하나의 5×5 윈도우를 사용하여 에지를 검출하였다. 기존의 방법들은 에지방향에 관계없이 똑같은 형태의 윈도우를 사용하였다.

본 논문에서는 그림 1(a)의 수직 방향의 에지를 검출하는 방법에 대해 논의하고 최종적인 에지는 각 방향의 에지들의 논리합 연산을 수행함으로써 얻어진다. 인접한 두 개의 근방영역 중에서 왼쪽 근방영역을 $A_L = \{X_1, \dots, X_n\}$, 오른쪽 근방영역을 $A_R = \{X_{n+1}, \dots, X_{2n}\}$ 이라 하고 X_1, \dots, X_n 과 X_{n+1}, \dots, X_{2n} 은 서로 독립이고 각각 연속 분포 $F_1(x) = F(x - \mu_1)$ 과 $F_2(x) = F(x - \mu_2)$ 로부터 확률 표본이라 하자. 여기서 μ_1 과 μ_2 는 위치모수이다. 에지-높이 모수 δ 을 사용한 에지 모형은 다음과 같이 표현한다.

$$\alpha_i = \begin{cases} X_i + \delta, & X_i \in A_L \\ X_i, & X_i \in A_R \end{cases}, \beta_i = \begin{cases} X_i - \delta, & X_i \in A_L \\ X_i, & X_i \in A_R \end{cases}$$

여기서 δ 는 두 영역 사이의 차이가 명확하지 않으면 에지로 판정하는 것을 막기 위한 모수이다. 따라서 δ -에지 모형 하에서 검정하고자 하는 가설은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$H_0 : |\mu_1 - \mu_2| = \delta, \quad H_1 : |\mu_1 - \mu_2| > \delta.$$

우리는 영상에서 H_0 을 검정하는 방법을 논의하기 전에 이표본 선형 순위 검정법에 대해 먼저 논의하고자 한다.

두 모집단의 혼합표본 X_1, \dots, X_{2n} 에서 X_i 의 순위를 R_i 라 할 때 선형 순위 검정법은 다음의 검정 통계량에 토대를 둔다[7].

$$S = \sum_{i=1}^{2n} c(i)a(R_i), \dots\dots\dots (21)$$

여기서 $c(i)$ 는 회귀상수(regression constant)이고 $a(i)$ 는 스코어(score)이다. 만약

$$c(i) = 1, \quad i = 1, \dots, n \\ = 0, \quad i = n + 1, \dots, 2n$$

이면 (21)식의 검정 통계량 S 은 다음과 같이 단순한 형태로 표현된다.

$$S = \sum_{i=1}^n a(R_i) \dots\dots\dots (22)$$

여기서 식(22)의 S 는 (X_1, \dots, X_n) 의 순위들에 대한 스코어들의 합이다. S 의 분포는 두 모평균이 같다는 귀무가설 하에서 다음과 같다.

$$E_0(S) = 2n\bar{a} \\ Var_0(S) = \frac{n}{2(2n-1)} \sum_{i=1}^{2n} (a(i) - \bar{a})^2$$

여기서 $\bar{a} = (1/2n) \sum_{i=1}^{2n} a(i)$ 이다. 따라서 표본의 크기 n 이 크면 표준화된 S 통계량은 표준정규분포를 갖는다.

2.1 Wilcoxon 방법

δ -에지 모형 하에서 가설 H_0 을 검정하기 위해 먼저 $\mu_1 < \mu_2$ 가정 하에 H_1 에 대한 검정법을 생각하자. R_i 을 α_i 의 순위라 할 때 검정 통계량은 다음과 같다.

$$W_\alpha = \sum_{i=1}^{2n} R_i I_{\alpha_i},$$

여기서 $I_{\alpha_i} = \begin{cases} 0, & R_i \in \{ \alpha_1, \dots, \alpha_n \} \\ 1, & R_i \in \{ \alpha_{n+1}, \dots, \alpha_{2n} \} \end{cases}$ 이다. 다음으로 $\mu_1 > \mu_2$ 가정 하에 H_1 에 대한 검정법으로 S_i 을 β_i 의 순위라 할 때 검정 통계량은 다음과 같다.

$$W_\beta = \sum_{i=1}^{2n} S_i I_{\beta_i},$$

여기서 $I_{\beta_i} = \begin{cases} 1, & S_i \in \{ \beta_1, \dots, \beta_n \} \\ 0, & S_i \in \{ \beta_{n+1}, \dots, \beta_{2n} \} \end{cases}$ 이다. 따라서,

가설 H_0 을 검정하기 위한 검정 통계량은 다음과 같다.

$$W^* = \max(W_\alpha, W_\beta) \dots\dots\dots (23)$$

이다. n 이 크면

$$Z_{W^*} = \frac{W^* - E(W^*)}{[Var(W^*)]^{1/2}} \dots\dots\dots (24)$$

은 표준 정규 분포를 따른다. 여기서

$$E(W^*) = n(n+1)/2, \quad Var(W^*) = n^2(2n+1)/12$$

이다.

검정통계량 식(23)의 W^* 혹은 식(24)의 Z_{W^*} 가 임계값보다 크면 그림 1(a)의 중심픽셀에 에지가 존재한다고 판정한다.

2.2 Median 방법

δ -에지 모형 하에서 가설 H_0 을 검정하기 위해 $\mu_1 < \mu_2$ 가정 하에 H_1 에 대한 검정 통계량은 다음과 같다.

$$M_\alpha = \sum_{i=1}^{2n} a_M(R_i) I_{\alpha_i} \\ = [\text{혼합표본에서 중앙값보다 큰 } \alpha_i \text{ 들의 갯수}]$$

그리고 $\mu_1 > \mu_2$ 가정 하에 H_1 에 대한 검정 통계량은 다음과 같다.

$$M_\beta = \sum_{i=1}^{2n} a_M(S_i) I_{\beta_i} \\ = [\text{혼합표본에서 중앙값보다 큰 } \beta_i \text{ 들의 갯수}]$$

따라서, 가설 H_0 을 검정하기 위한 검정 통계량은 다음과 같다.

$$M^* = \max(M_\alpha, M_\beta) \dots\dots\dots (25)$$

이다. n 이 크면

$$Z_{M^*} = \frac{M^* - E(M^*)}{[Var(M^*)]^{1/2}} \dots\dots\dots (26)$$

은 표준 정규 분포를 따른다.

여기서

$$E_0(M^*) = n/2 \text{ 이고 } Var_0(M^*) = n^2/[4(2n-1)]$$

이다.

검정통계량 식(25)의 M^* 혹은 식(26)의 Z_{M^*} 가 임계값보다 크면 에지가 존재한다고 판정한다.

2.3 Van der Waerden 방법

δ -에지 모형 하에서 가설 H_0 을 검정하기 위해 $\mu_1 < \mu_2$ 가정 하에 H_1 에 대한 검정 통계량은 다음과 같다.

$$V_\alpha = \sum_{i=1}^{2n} \Phi^{-1}\left(\frac{R_i}{2n+1}\right) I_{\alpha_i},$$

여기서 $\Phi^{-1}(t)$ 는 표준정규분포의 t 번째 백분위수이다. 다음으로 $\mu_1 > \mu_2$ 가정 하에 H_1 에 대한 검정 통계량은 다음과 같다.

$$V_\beta = \sum_{i=1}^{2n} \Phi^{-1}\left(\frac{S_i}{2n+1}\right) I_{\beta_i},$$

따라서, 가설 H_0 을 검정하기 위한 검정 통계량은 다음과 같다.

$$V^* = \max(V_\alpha, V_\beta) \dots\dots\dots (2.7)$$

이다. n 이 크면

$$Z_{V^*} = \frac{V^* - E(V^*)}{[Var(V^*)]^{1/2}} \dots\dots\dots (2.8)$$

은 표준 정규 분포를 따른다. 여기서 $E(V^*) = 0$,

$$Var(V^*) = n^2 \left[\sum_{i=1}^{2n} \Phi^{-1}\left(\frac{i}{2n+1}\right)^2 \right] / 2n(2n-1).$$

검정통계량 식(2.7)의 V^* 혹은 식(2.8)의 Z_{V^*} 가 임계값보다 크면 에지가 존재한다고 판정한다.

III. 에지검출 성능비교

이 절에서는 앞에서 논의된 Wilcoxon 방법, Median 방법 그리고 Van der Waerden 방법의 에지검출 성능을 비교하기 위해 자연영상, 인조영상 그리고 표 1에 주어진 여러 가지 잡음이 추가된 잡음영상을 가지고 실험한다. 여기에 사용된 가우시안 잡음(Gaussian noise)은 평균이 0이고 주어진 표준편차를 갖는 잡음이고 임펄스 잡음(impulse noise)은 픽셀값이 0과 255값을 갖는 잡음이다. 가우시안 잡음에서 신호 대 잡음비인 SNR (signal-to-noise ratio)은 다음과 같다.

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

여기서 40은 인조영상에서 가정된 에지높이이고 σ 은 잡음 표준편차이다.

표 1. 여러 가지 잡음분포형태
Table 1. different types of noise

잡음	잡음형태	발생확률	SNR(표준편차)
G20	가우시안		20 (4.0)
G15	가우시안		15 (7.11)
G10	가우시안		10 (12.65)
I0.05	임펄스	0.05	
I0.1	임펄스	0.1	

3.1 자연영상

영상실험에 사용된 자연영상으로는 그림 2에 나와 있는 Lena 영상, Wheel 영상, House 영상과 이들 영상으로부터 얻어진 잡음영상들이다.

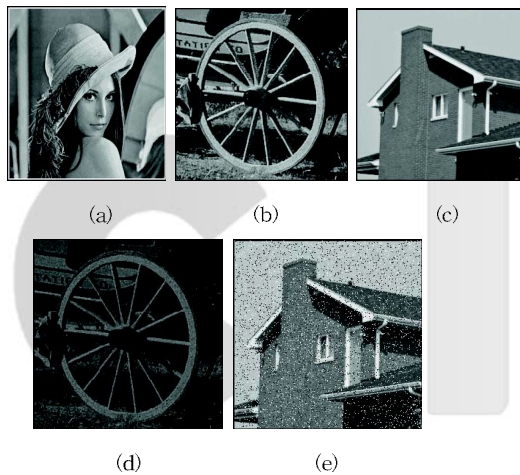


그림 2. 자연영상 (a) Lena image (b) Wheel 영상 (c) House 영상 (d) G15 잡음 Wheel 영상 (e) I0.1 잡음 House 영상
Fig 2. Natural images: (a) Lena image (b) Wheel image (c) House image (d) Wheel image corrupted by G15 (e) House image corrupted by I0.1.

먼저, $\delta=15$ 인 에지모형 하에서 관심있는 3개의 에지검출법들을 잡음이 없는 자연영상 그림 2(a), 2(b) 그리고 2(c)에 대해 실험하였다. 유의수준 0.05에서 가설 검정하였으며 3가지 영상에 대해 실험한 결과 각각의 방법들은 비슷한 결과를 얻었다. 그림 3은 그림 2(a)의 Lena영상에 대한 결과이다.

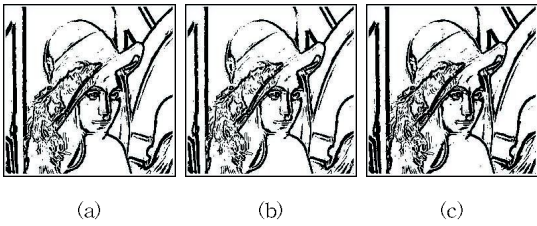


그림 3. 그림 2(a)에 적용하여 얻은 에지맵 (a)은 Wilcoxon 방법, (b) Median 방법, (c) Van der Waerden 방법

Fig 3. Edge detection results for Lena image in Fig 2(a): (a) Wilcoxon detector (b) Median detector (c) Van der Waerden detector

그림 3으로부터 3가지 모든 방법들이 잡음이 없는 자연영상에 대해 에지를 잘 검출함을 알 수 있다. Wilcoxon 방법과 Median 방법은 비슷한 에지맵을 보여주고 있고 Van der Waerden 방법은 위의 두 가지 방법보다 약간 진한 에지맵을 보여주고 있으나 어느 방법이 우수하다고 단정할 수는 없다.

그림 4는 그림 2(d)의 가우시안 잡음 $G15$ 를 추가한 Wheel 잡음영상에 에지검출법을 적용하여 얻은 결과이다. 가우시안 잡음 영상에 대해서도 모든 방법들이 에지를 잘 검출함을 보여주고 있다. 특히, 그림 4(c)의 Van der Waerden 방법은 다른 방법에 비해 에지를 진하게 검출하는 반면에 약간의 잡음도 검출함을 알 수 있다.

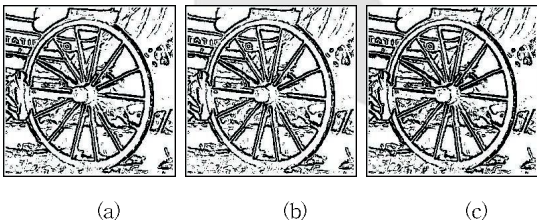


그림 4. 그림 2(d)에 적용하여 얻은 에지맵 (a) Wilcoxon 방법, (b) Median 방법, (c) Van der Waerden 방법

Fig 4. Edge detection results for Wheel image in Fig 2(d): (a) Wilcoxon detector (b) Median detector (c) Van der Waerden detector.

그림 5는 그림 2(e)의 임펄스 잡음 $I0.1$ 을 추가한 House 잡음영상에 에지검출법을 적용하여 얻은 결과이다. 임펄스 잡음 영상에 대해서는 Wilcoxon 방법이 Median 방법보다 약간의 잡음을 더 검출함을 알 수 있고 Van der Waerden 방법은 비교적 많은 잡음을 검출함을 알 수 있다. Van der Waerden 방법이 임펄스 잡음에 민감한 이유

는 그의 통계량이 표준정규분포로부터 얻어지기 때문이다.

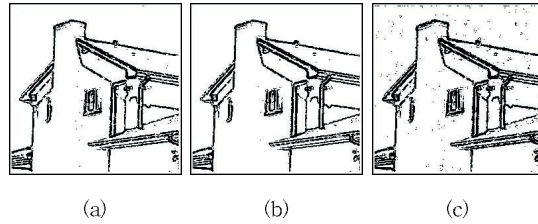


그림 5. 그림 2(e)에 적용하여 얻은 에지맵 (a) Wilcoxon 방법, (b) Median 방법, (c) Van der Waerden 방법

Fig 5. Edge detection results for House image in Fig 2(e): (a) Wilcoxon detector (b) Median detector (c) Van der Waerden detector.

3.2 인조영상

에지검출법들의 정량적인 성능비교를 하기 위해 그림 6에 나와있는 인조영상과 그로부터 얻어진 잡음영상을 가지고 실험한다. 인조영상은 내부에 두 개의 수평과 수직에지를 갖고 있는 정사각형 모양의 에지를 포함하고 있으며 정사각형 내부의 픽셀값들은 115이고 정사각형 외부의 픽셀값들은 155로 이루어져 있다. 잡음영상은 원래의 인조영상에 가우시안 잡음 $G20$, $G15$, $G10$ 그리고 임펄스 잡음 $I0.05$, $I0.1$ 을 추가하여 얻었다.

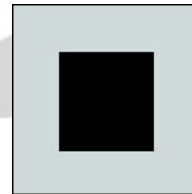


그림 6. 인조영상

Fig 6. Synthetic image

인조영상에서 성능비교를 위한 객관적인 척도로서 우리는 Pratt[8]의 Figure of merit(PFOM)

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

을 사용한다. 여기서 $I_N = \max(I_I, I_A)$ 그리고 I_I 와 I_A 은 각각 실제 에지수와 검출된 에지수이다. 그리고 β 는 스케일 상수(여기서 $\beta=1/9$)이고 d_i 는 잘못 검출된 i 번째 에지점이

실제 에지점과의 거리이다.

표 2는 $\delta = 10, 15$ 그리고 20인 경우 여러 가지 인조영상에 대해 Wilcoxon 방법, Median 방법, Van der Waerden 방법을 적용하여 PFOM을 계산한 결과이다. 표 2로부터 가우시안 잡음영상에 대하여 3가지 방법들은 거의 비슷한 성능을 보이고 있으나 대체로 Wilcoxon 방법이 약간 우위에 있는 것처럼 보인다. 임펄스 잡음영상에 대해서는 Median 방법, Wilcoxon 방법 그리고 Van der Waerden 방법 순으로 성능을 보여주고 있다. 특히 Van der Waerden 방법이 인조영상에서 성능 저하현상은 3.1절에서 살펴본 바와 같이 자연영상에서도 같은 결과를 얻을 수 있었다.

표 2. 3 가지 에지검출 방법들의 PFOM
Table 2. PFOM for three edge detectors

잡음	δ	에지검출법		
		Wilcoxon 방법	Median 방법	Van der Waerden 방법
G20	10	0.949	0.949	0.949
	15	0.949	0.949	0.949
	20	0.949	0.949	0.949
G15	10	0.940	0.936	0.914
	15	0.949	0.949	0.949
	20	0.949	0.949	0.950
G10	10	0.754	0.726	0.642
	15	0.914	0.900	0.881
	20	0.945	0.942	0.942
I0.05	10	0.949	0.950	0.855
	15	0.949	0.950	0.855
	20	0.949	0.950	0.855
I0.1	10	0.947	0.947	0.920
	15	0.947	0.947	0.920
	20	0.947	0.947	0.920

지금까지 에지검출은 주로 잡음이 없는 단순한 영상에 대하여 많은 연구가 진행되어왔다. 잡음영상에 대해서는 잡음과 에지가 고주파성분으로 인하여 에지만을 검출하는 것은 쉽지 않다.

본 논문에서는 이표본 위치문제에서 잘 알려진 선형 순위검정법에 기초한 Wilcoxon 방법, Median 방법 그리고 Van der Waerden 방법을 이용하여 에지를 검출하였다. 에지유무는 잡음영상에서 잡음에 덜 민감하게 반응하기 위해 에지-높이 모수를 포함한 새로운 모형 하에서 인접한 두 개의 근방영역간의 평균 차이를 검정함으로서 통계적으로 결정한다. 여기서 근방영역의 크기는 에지검출을 위한 계산속도를 고려하여 가능한 작은 윈도우를 선택하고 근방영역의 형태는 에지방향을 따라 적응성 있게 결정하였다.

통계적 에지검출법들의 성능을 비교하기 위해 자연영상, 인조영상 그리고 여러 가지 잡음이 추가된 잡음영상을 가지고 실험하였다.

자연영상과 그의 잡음영상에 대하여 통계적 방법들은 에지를 비교적 잘 검출함을 알 수 있었다. 그러나 임펄스 잡음영상에 대해 Van der Waerden 방법이 약간 성능이 떨어짐을 알 수 있었다. 그리고 PFOM을 통한 영상실험에 있어서는 가우시안 잡음영상에 대해서는 거의 비슷한 성능을 보이고 있으나 임펄스 잡음영상에 대해서는 Median 방법, Wilcoxon 방법 그리고 Van der Waerden 방법 순으로 성능을 보여주고 있다.

향후 연구내용으로는 지금까지 시행착오식으로 결정하던 에지-높이 모수를 적절한 추정을 통하여 결정함으로서 영상의 에지검출 시간을 줄이는 연구가 필요하다.

참고문헌

- [1] 임동훈, "웹 상에서 통계적 에지검출기 개발 및 구현", 한국컴퓨터정보학회논문지, 제10권 제4호, pp.49-55, 2005. 9.
- [2] 임동훈, "영상에서 선형순위검정법을 이용한 에지검출 비교", 한국컴퓨터정보학회논문지, 제10권 제6호, pp.17-25, 2005. 12.

IV. 결론 및 향후 과제

- [3] Gonzales, R. C. and Woods, R. E. Digital Image Processing, Addison-Wesley Publishing Company, 1992.
- [4] Bovik, A. C., Huang, T. S. and Munson, D. C. "Nonparametric Tests for Edge Detection in Noise", Pattern Recognition, 19(3), 209-219, 1986.
- [5] Lim, D. H. and Jang, S. J. "Comparison of Two-sample Tests for Edge Detection in Noisy Images". Journal of the Royal Statistical Society Series D-The Statistician, 51(1), 21-30, 2002.
- [6] Lim, D. H. "Robust Edge Detection in Noisy Image", Computational Statistics and Data Analysis. 50(3), 803-812, 2006.
- [7] Randles, R.H. and Wolfe, D.A. "Introduction to the Theory of Nonparametric Statistics". John Wiley & Sons, New York. 1979.
- [8] Pratt, W. " Digital Image Processing", New York: Wiley, 1978.

저 자 소개



임 동 훈

경상대학교 기초과학연구소 및 컴퓨터정보통신연구소 연구원
경상대학교 정보통계학과 교수
<관심분야> 영상처리, 정보통계학