

경계선 검출 성능에 영향을 주는 변수 변화에 따른 경계선 검출 알고리즘 성능의 정량적인 평가 방법

정회원 양희성*, 김유호*, 한정현*, 이은석*, 이준호*

A Method for Quantitative Performance Evaluation of Edge Detection Algorithms Depending on Chosen Parameters that Influence the Performance of Edge Detection

Hee-Sung Yang*, Yu-Ho Kim*, Jung-Hyun Han*, Eun-Seok Lee*, June-Ho Yi*

Regular Members

요 약

본 논문에서는 경계선 검출 알고리즘의 성능을 측정하기 위하여 경계선 검출 성능에 영향을 미칠 수 있는 변수를 변화시키면서 알고리즘의 경계선 검출 성능을 평가하는 정량적인 방법을 제안하였다. 주로 영상에 첨가된 잡음의 양을 변화하여 경계선 검출 성능을 측정한 기존의 방법과는 달리 제안된 방법은 경계선 검출 성능에 영향을 미치는 변수(예를 들어, 곡선 경계선의 곡률, 검출하려는 직선 경계선과 같이 존재하는 다른 직선 경계선의 각도 등)를 변화시키면서 경계선 검출 알고리즘의 성능을 정량적으로 평가할 수 있는 평균 평가 지수를 제안한다. 또한 제안한 방법의 예결과 보이기 위해 컴퓨터 시각 분야에서 대표적으로 사용되는 경계선 검출 알고리즘인 Sobel, LOG(Laplacian of Gaussian), Canny 경계선 검출 알고리즘에 대해 적용하여 가우시안 잡음(Gaussian noise)과 임펄스 잡음(impulse noise)을 각각 첨가한 직선 경계선과 곡선 경계선 영상에 대하여 실험하였다. 직선 경계선 검출에 대하여는 관심이 되는 직선 경계선의 검출을 방해하는 주변의 직선 경계선들의 각도를 관심 변수로 사용하였고, 곡선 경계선 검출에 대하여는 곡선 경계선 자체의 곡률을 관심 변수로 하여 위 세 가지 경계선 검출 알고리즘의 성능을 비교 평가하였다. 제안된 경계선 검출 알고리즘 성능 측정 방법은 경계선 검출 알고리즘의 여러 응용 분야 중에서 사용하고자 하는 특정 분야에 적합한 최적의 경계선 검출 알고리즘을 선택할 수 있도록 하여 준다.

ABSTRACT

This research features a method that quantitatively evaluates the performance of edge detection algorithms. Contrary to conventional methods that evaluate the performance of edge detection as a function of the amount of noise added to the input image, the proposed method is capable of assessing the performance of edge detection algorithms based on chosen parameters that influence the performance of edge detection. We have proposed a quantitative measure, called *average performance index*, that compares the average performance of different edge detection algorithms. We have applied the method to the commonly used edge detectors, Sobel, LOG(Laplacian of Gaussian), and Canny edge detectors for noisy images that contain straight line edges and curved line edges. Two kinds of noises i.e., Gaussian and impulse noises, are used. Experimental results show that our method of

* 상경대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부(hsyang@ece.skku.ac.kr)

논문번호: 99509-1230 접수일자: 1999년 12월 30일

* 본 연구는 한국과학재단 '98 핵심진료연구(과제번호 981-0926-142-2) 지원으로 수행되었습니다.

quantitatively evaluating the performance of edge detection algorithms can facilitate the selection of the optimal edge detection algorithm for a given task.

I. 서론

경계선은 영상을 분석하기 위한 기본적인 주요한 특징(feature)으로서 오랜 동안 경계선 검출 알고리즘에 대한 많은 연구가 있었다^{1)~3)}. 하지만 많은 연구에도 불구하고 경계선 검출 알고리즘 연구에 있어서 획기적인 발전은 이루어지지 않고 있다. 또한 경계선 검출 알고리즘의 성능 측정용 위한 여러 가지 연구가 있어 왔으나 경계선 검출 알고리즘 연구의 발전을 위하여 폭넓게 받아들여질 수 있는 객관적인 성능 측정 방법은 아직 존재하지 않고 있다.

기존의 경계선 검출 알고리즘의 성능 측정 방법은 크게 정량적인 방법과 정성적인 방법으로 나누어진다. 정량적인 방법^{4)~7)}은 주로 영상에 첨가된 잡음의 양을 경계선 검출 성능에 영향을 미치는 변수로 정하여 잡음의 양을 변화시키면서 경계선 검출 에러율, 즉, P_e 와 경계선의 위치 검출의 에러를 측정함으로써 이루어져 왔다. 여기서 P_e 는 검출하고자 하는 의미있는 경계선을 검출하지 못하는 미검출의 확률인 $P(\text{미검출})$ 과 부적절한 경계선을 의미있는 경계선으로 검출하는 잘못된 검출의 확률인 $P(\text{잘못된 검출})$ 의 합으로 나타내어진다. 이러한 방법들은 경계선 검출의 성능에 영향을 미치는 다른 변수들을 고려할 수 없는 단점을 가지고 있다. 최근 어떤 주어진 특징(예를 들어, 경계선)에 대하여, 특징 검출 성능에 영향을 미치는 변수를 선택하여 그 변수를 변화시키면서 특징 검출 알고리즘들의 성능을 비교 평가할 수 있는 일반적인 방법에 대한 연구⁸⁾가 보고되었다. 하지만 정량적인 숫자로 특징 검출 알고리즘의 성능을 제시하는 방법은 고려되지 않았으며 컴퓨터 시각 분야에서 대표적인 Sobel¹⁾, LOG(Laplacian of Gaussian)²⁾, Canny 경계선 검출 알고리즘³⁾에 대한 성능 평가도 이루어지지 않았다. 정성적인 방법⁹⁾은 경계선 검출의 결과를 평가자가 눈으로 보고 판단하는 방법으로서 실제 영상에 대한 주요한 측정 방법이 될 수 있지만 평가자의 주관에 배제할 수 없다는 객관성에 문제가 있다. 하지만 인간에 의한 주관적인 정성적인 방법도 경계선 검출 성능을 측정하는 주된 수단이기 때문에 정량적인 방법과 함께 연구되어 두 가지 평가방법이 상

호 보완적인 역할을 하도록 하여야 한다. 본 연구에서는 두 가지 연구 방법 중 정량적인 평가방법에 초점을 두어 경계선 검출 알고리즘이 사용되고 있는 여러 응용 분야 중에서 사용하고자 하는 특정 분야에 적합한 최적의 경계선 검출 알고리즘의 선택을 위한 방법을 제안한다.

본 연구에서는 경계선 검출 성능에 영향을 미치는 변수(예를 들어, 곡선 경계선의 곡률, 검출하려는 직선 경계선과 같이 존재하는 다른 직선 경계선의 각도 등)를 관심 변수라고 칭하고, 이 변수를 변화시키면서 경계선 검출 알고리즘의 성능을 평가할 수 있는 정량적인 방법을 제안한다. 제안한 방법의 적용 예를 보이기 위하여 컴퓨터 시각 분야에서 대표적으로 사용되는 경계선 검출 알고리즘인 Sobel, LOG(Laplacian of Gaussian), Canny 경계선 검출 알고리즘에 대해 적용하여 가우시안 잡음(Gaussian noise)과 임펄스 잡음(impulse noise)을 각각 첨가한 직선 경계선과 곡선 경계선 영상에 대하여 실험하였다. 직선 경계선 검출에 대하여는 관심이 되는 직선 경계선의 검출을 방해하는 주변의 직선 경계선들의 각도를 관심 변수로 사용하였고, 곡선 경계선 검출에 대하여는 곡선 경계선 자체의 곡률을 관심 변수로 하여 위 세 가지 경계선 검출 알고리즘의 성능을 비교 평가하였다. 제안한 정량적 평가방법을 간략히 요약하면 다음과 같다. 각각의 관심 변수값에 대하여 주어진 경계선 검출 성능을 얻기 위해 필요한 경계선 음영값 차이를 계산하여, 관심 변수 대 경계선 음영값 차이의 곡선을 생성하게 된다. 이 곡선은 관심 변수의 변화에 따라 의미있는 경계선 검출에 필요한 경계선 음영값 차이를 나타내므로 곡선이 낮은 값의 경계선 음영값 차이를 나타낼수록 경계선 음영값 차이가 작아도 의미있는 경계선 검출이 가능함을 보여준다. 따라서 경계선 검출 성능을 평가하고자 하는 알고리즘들이 일정한 경계선 검출 성능을 나타낼 때 하나의 알고리즘이 다른 알고리즘들의 경계선 음영값 차이보다 작다면 이것은 작은 값의 경계선 음영값 차이를 갖는 알고리즘의 경계선 검출 성능이 다른 알고리즘의 경계선 검출 성능에 비하여 보다 더 우수함을 나타낸다. 또한 경계선 검출 알고리즘의 관심 변수의 변화에 따른 경계선 검출 성능의 평균 성능을 정량적으로 나타낸

평균 평가 지수를 제안하였다.

본 연구는 경계선 검출 알고리즘의 비교를 위한 정량적인 성능 측정 방법을 제시하고 제안한 방법을 컴퓨터 시각 분야에서 표준으로 사용되는 세 가지 경계선 검출 알고리즘인 Sobel, LOG(Laplacian of Gaussian), Canny 경계선 검출 알고리즘에 대하여 평가하였다는 점에 의의가 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 다음 장에서는 특징 검출에 영향을 미치는 변수를 변화시키면서 특징 검출 알고리즘의 성능을 평가하는 일반적인 방법에 대한 설명과 함께 제안하는 정량적인 평가 방법에 대하여 기술한다. 제 3장에서는 실험 영상 및 실험 방법에 대하여 설명하고 제 4장에서는 실험 결과에 대하여 기술한다.

II. 경계선 검출 성능 측정 방법

본 연구는 검출 성능에 영향을 미치는 변수를 변화시키면서 특징 검출 알고리즘의 성능을 평가하는 일반 방법론^[8]에 기거하였으며 2.1절에서 그 방법을 간략히 기술하고 2.2절에서 제안한 정량적인 성능 평가 방법에 대하여 설명한다.

1. 관심 변수 변화에 따른 특징 검출 알고리즘의 성능 평가 방법

특징 검출 알고리즘의 성능을 관심 변수를 변화하며 평가하는 일반적인 방법에 대하여 간단히 요약하면 다음의 네 단계로 기술된다. 예를 들어, 관심의 대상이 되는 특징이 직선 경계선라고 가정하면, 첫째 단계에서는 관심 변수의 영향을 받으며 의미있는 경계선(true edge)인 직선 경계선을 포함한 영상과 의미있는 경계선을 포함하지 않고 관심 변수의 영향만을 받는 영상을 생성하고, 다양한 양의 잡음을 첨가하여 수많은 영상을 생성하고 이러한 영상들이 성능 측정 대상이 되는 경계선 검출 알고리즘의 입력으로 제공된다. 둘째 단계에서는 의미있는 경계선이 존재하는 영상인데 아닌 영상으로 판단할 확률인 $P(\text{미검출})$ 과, 그와 반대로 의미있는 경계선이 존재하지 않는 영상인데 존재하는 영상이라고 판단할 확률인 $P(\text{잘못된 검출})$ 을 계산하여 $P(\text{미검출})$ 대 $P(\text{잘못된 검출})$ 의 곡선을 구한다. 세 번째 단계에서는 전 단계에서 계산하는 $P(\text{미검출})$ 대 $P(\text{잘못된 검출})$ 의 곡선을 경계선 음영값 차이의 여러 가지 값 각각에 대하여 생성한다. 마지막 단계에서는 관심 변수값을 변화시켜가면서 앞의 세 단계를

되풀이하여 각각의 관심 변수 값에 대하여 일정한 에러율(Pe), 즉, 주어진 경계선 검출 성능을 얻기 위해 필요한 경계선 음영값 차이를 계산하여, 관심 변수 대 경계선 음영값 차이의 곡선을 생성하게 된다. 이 곡선은 관심 변수의 변화에 따라 의미있는 경계선 검출에 필요한 경계선 음영값 차이가 달라 내므로 곡선이 낮은 값의 경계선 음영값 차이를 나타낼수록 경계선 음영값 차이가 작아도 의미있는 경계선 검출이 가능함을 보여준다. 또한 곡선이 평평할수록 관심 변수의 변화에 대하여 경계선 검출 알고리즘의 성능이 관심 변수의 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 그림 1은 위의 마지막 단계에서 생성되는 관심 변수 대 경계선 음영값 차이의 곡선의 한 예이며 곡선 A가 곡선 B보다 관심 변수의 변화에 따라, 의미있는 경계선을 검출하는 데 필요한 경계선 음영값 차이가 낮은 값을 가지며 경계선 검출 알고리즘의 성능이 관심 변수의 영향을 덜 받을 수 있다.

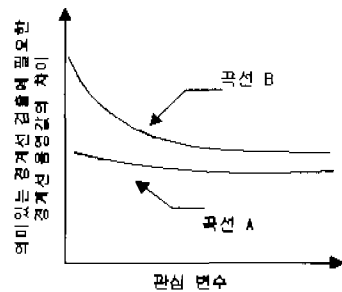
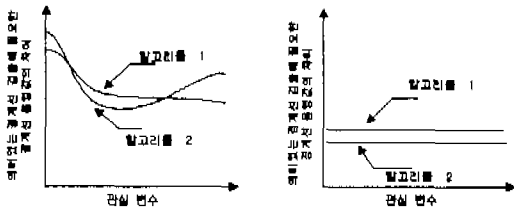


그림 1. 관심 변수 대 경계선 음영값 차이 곡선의 한 예

2. 정량적 성능 측정 방법

위에서 기술한 마지막 단계의 결과로 생성되는 그림 1의 곡선('성능 곡선'이라 칭함)으로 경계선 검출 알고리즘 A, B의 성능을 비교하고자 할 때 알고리즘 A에 해당되는 성능 곡선이 알고리즘 B에 해당되는 성능 곡선의 아래 부분에 위치하고 평평한 형태를 보인다면 알고리즘 A의 성능이 알고리즘 B의 성능보다 우월함은 분명하다고 할 수 있다. 하지만 알고리즘 A의 성능 곡선이 모든 관심 변수 값에 대하여 알고리즘 B의 성능 곡선보다 우월하지 않은 경우, 즉 알고리즘 A의 성능 곡선과 알고리즘 B의 성능 곡선이 교차점(들)을 갖는 경우(그림 2(a) 참조)에 평균적으로 어느 알고리즘의 경계선 검출 성능이 우수한지를 알려주는 개략적이고 정량적인 지표가 필요하다.



a) 관심 변수가 적용된 성능 곡선 b) 관심 변수가 적용되지 않은 성능 곡선

그림 2. 관심 변수 대 경계선 용량값 차이의 성능 곡선

본 연구에서는 성능 곡선의 경계선 용량값 차이의 평균값과 평평한 정도를 측정하여 경계선 검출 알고리즘의 평균 성능을 정의하는 평균 평가 지수를 다음과 같이 제안한다.

$$\text{평균 평가 지수} = \lambda_1 (M_1 + \delta^2) + \lambda_2 M_2 \quad (1)$$

M_1 은 실제로 관심 변수를 변화시키면서 생성한 영상들에 적용하여 얻은 성능 곡선의 경계선 용량값 차이의 평균값이며, M_2 는 관심 변수가 변하지 않는 영상들에 적용하여 얻은 성능 곡선의 경계선 용량값 차이 값이다. 관심 변수가 변하지 않는 영상들에 적용하여 얻은 성능 곡선은 그림 2의 (b)와 같이 직선으로 나타난다. λ_1 과 λ_2 는 가중치이며 관심 변수가 적용된 성능 곡선과 관심 변수가 적용되지 않은 성능 곡선을 평균 평가 지수에 반영하는 비율을 의미하며 $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$ 이다. λ_1 과 λ_2 에 대한 특정한 값의 선택은 경계선 검출 알고리즘을 적용할 주어진 문제에 따라 결정된다. δ^2 은 관심 변수가 적용된 성능 곡선의 경계선 용량값 차이의 분산값으로서 성능 곡선이 M_1 값을 나타내는 수평 직선으로부터 벗어난 정도의 평균값이다. 위의 식 (1)의 평균 평가 지수가 낮은 알고리즘이 경계선 검출 성능이 좋다는 것을 의미한다.

실험에서는 $\lambda_1 = \lambda_2 = 1/2$ 를 사용하였다.

제한한 평균 평가 지수를 컴퓨터 시각 분야에서 대표적으로 사용되는 경계선 검출 알고리즘인 Sobel, LOG(Laplacian of Gaussian), Canny 경계선 검출 알고리즘에 대해 적용하여 직선 경계선과 곡선 경계선에 대하여 실험하였다. 직선 경계선 검출에 대하여는 검출하고자 하는 경계선인 직선 경계선의 검출을 방해하는 주변의 다른 직선 경계선들의 각도를 관심 변수로 사용하였고, 곡선 경계선 검출에 대하여는 곡선 경계선 자체의 곡률 변화 관심 변

수로 하여 위 세 가지 경계선 검출 알고리즘의 성능을 정량적으로 비교 평가하였다.

II. 실험 영상 생성 및 실험 방법

1. 평가 대상 경계선 검출 알고리즘

본 연구는 일반적인 경계선 검출 성능 평가를 위해서 보편적으로 가장 많이 사용되는 Sobel, Canny, LOG(Laplacian of Gaussian) 경계선 검출 알고리즘이 사용되었다. Canny 경계선 검출 알고리즘은 7×7 mask를 사용하여 가우시안(Gaussian) 필터를 적용한 후, 미최대 제거(nonmaxima suppression)과정 그리고 이중 임계치 연산(double thresholding)을 거쳐 최종 경계선 영상을 얻어내고, LOG 경계선 검출 알고리즘 또한 7×7 마스크(mask)를 사용하여 가우시안 필터를 적용한 후 Laplacian 경계선 검출 알고리즘을 적용하여 경계선을 검출하였다. Sobel 경계선 검출 알고리즘은 실제적인 응용 분야에서 가장 많이 쓰이는 1계 미분 연산자로서 단순히 3×3 마스크를 입력 영상에 콘볼루션(convolution)을 취하여 경계선 영상을 얻는다. 직선 경계선과 곡선 경계선의 검출 성능에 대하여 실험하였고 직선 경계선 실험에서는 의미있는 경계선인 직선 경계선 검출을 방해하는 주변의 다른 직선 경계선의 각도 변화를 관심 변수로 정하고, 곡선 경계선 실험에서는 곡선 경계선 자체의 곡률 변화 관심 변수로 정하여 성능을 평가하였다.

2. 직선 경계선 영상

직선 경계선 검출에서 의미있는 경계선인 직선 경계선외에 함께 존재하는 다른 직선 경계선의 각도가 경계선 검출에 영향을 미치므로 이러한 방해 직선 경계선의 각도를 관심 변수로 정하여 다음과 같은 실험 영상을 생성한다. 실험에 사용된 영상의 크기는 256×256 이며 실험 영상은 다음과 같이 두 가지 종류로 정의된다. 첫 번째 영상은 의미있는 경계선인 직선 경계선 검출을 방해하는 다른 직선 경계선과 잡음 그리고 의미있는 경계선으로 이루어져 있으며, 두 번째 영상은 방해 직선 경계선과 잡음만으로 이루어져 있는 의미있는 경계선이 없는 영상이다. 방해 직선 경계선과 의미있는 경계선의 경계선 용량값 차이는 용량값 100을 기준으로 생성한다. 방해 직선 경계선의 경계선 용량값 차이는 기준 용량값의 10% 그리고 의미있는 경계선의 경계선 용량값 차이는 기준 용량값의 2%부터 26%까지 변화하며

생성한다. 의미있는 경계선의 검출을 방해하는 직선 경계선은 (2)식에 의해서 생성되는데 먼저 중심점(x, c)을 구한 후, 각 점에 대한 (2)식의 값이 0보다 크면 $f(x, y)$ 위치에 있는 화소에 음영값 105(즉, 평균값 + 방해 직선 경계선의 경계선 음영값 차이 / 2)를 대입하고, 0보다 작으면 음영값 95(평균값 - 방해 직선 경계선의 경계선 음영값 차이 / 2)를 대입하여 생성한다. 검출하고자 하는 의미있는 경계선은 영상에 (의미있는 경계선의 경계선 음영값 차이) / 2의 값을 더하거나 빼주어 생성하도록 하였다. 생성되어진 방해 직선 경계선은 수직 방향을 기준으로 시계 방향으로 각도 변화, $\theta = 0, 1, 3, 5, 45, 90^\circ$ 에 대하여 각각 생성하게 된다. 이 방해 직선 경계선의 각도값이 관심 변수로서 여러 다른 각도값의 직선 경계선들이 의미있는 경계선의 검출에 영향을 미치게 된다. 또한 의미있는 경계선과 방해 직선 경계선의 위상차(ϕ)는 180° 로 고정시켜 상쇄 간섭을 일으키도록 하여 16 화소(W) 만큼의 위상차를 가진다. 의미있는 경계선을 포함한 실험 영상의 생성은 다음과 같다. 먼저 의미있는 경계선의 검출을 방해하는 θ 의 각도를 갖는 직선 경계선 영상과 의미있는 경계선 영상을 더하고 여기에 잡음을 첨가하여 얻게 된다. 그림 3의 (b)는 의미있는 경계선이 존재하는 영상으로서 의미있는 경계선의 검출을 방해하는 직선 경계선의 각도가 45° 인 실험 영상의 예를 보여준다. 의미있는 경계선을 포함하지 않은 영상은 위의 과정에서 의미있는 경계선을 더하는 단계를 생략하여 생성한다. 그림 3의 (a)는 방해 직선 경계선과 가우시안 잡음으로 구성된 의미있는 경계선이 존재하지 않은 영상으로서 방해 직선 경계선의 각도가 45° 인 실험 영상의 한 예이다.

실험 영상으로서 가우시안 잡음 영상과 임펄스 잡음 영상을 생성하여 실험하였다. 가우시안 잡음은 평균값이 0이고 표준편차가 20이며 극좌표 방법(polar method)^[10]을 이용하여 생성하였으며 임펄스 잡음은 발생확률 5%로 정하여 랜덤(random)하게 생성하였다.

$$f(x, y) = \sin[\{(x - r)\cos(\pi\theta/180) + (y - c)\sin(\pi\theta/180) + W\phi/180\} \pi/W] \quad (2)$$

3. 곡선 경계선 영상

다양한 곡률을 가진 실험 영상은 다양한 실제 곡선의 형태를 표현하므로 각 경계선 검출 알고리즘의 다양한 곡선에 대한 검출 성능을 평가하는데 사

용된다. 직선 경계선 영상과 동일한 256×256 영상이 사용되었다. 의미있는 경계선인 곡선 경계선을 포함한 영상은 (3)식을 이용하여 생성하였다.

$$f(x, y) = R^2 - ((x - r)^2 + (y - c)^2) \quad (3)$$

즉, 반지름 R인 원의 내부와 외부의 음영값을 달리함으로써 곡선 경계선을 생성하였다. 만약 $f(x, y) \geq 0$ 이면 영상 내 $f(x, y)$ 위치에 (음영값의 기준값 + 의미있는 경계선의 경계선 음영값 차이 / 2)의 값을 대입하고 $f(x, y) < 0$ 이면 (음영값의 기준값 - 의미있는 경계선의 경계선 음영값 차이 / 2)의 값을 대입하여 관심 변수인 곡률(1/R) 변화에 따른 의미있는 경계선을 가진 영상을 생성한다. 마지막으로 직선 경계선과 동일한 방법으로 생성된 잡음을 더하여 최종 실험 영상을 얻어낸다. 그림 3의 (c)와 (d)는 곡선 경계선 검출 실험에 사용되는 실험 영상으로서 의미있는 경계선을 포함하지 않은 영상과 포함한 영상을 각각 나타낸다.

직선, 곡선 경계선 검출 실험 공히 성능 평가 대상이 되는 알고리즘들을 적용하여 의미있는 경계선이 존재하는 영상과 의미있는 경계선이 존재하지 않는 영상에 대하여 경계선 검출하게 된다. 의미있는 경계선을 측정하고자 하는 영역은 경계선이 생성된 위치를 기준으로 왼쪽 한 화소 이동한 열과 오른쪽 한 화소 이동한 열인 총 세 개의 열의 위치로 정한다.

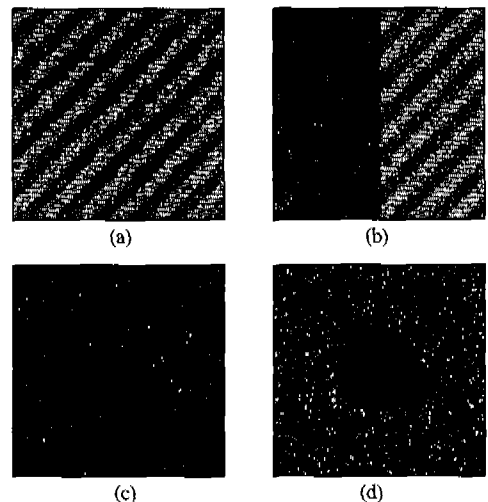


그림 3 가우시안 잡음이 첨가된 실험 영상

(a) 방해 직선 경계선만 존재하는 영상, (b) 의미있는 경계선이 존재하는 영상, 방해 직선 경계선 각도: 45° 경계선 음영값 차이: 평균값의 15%, (c) 의미있는 경계선이 존재하지 않는 영상, (d) 의미있는 경계선인 곡선 경계선이 존재하는 영상, 반지름: 50화소, 경계선 음영값 차이: 평균값의 15%

4. 실험 방법

본 실험은 총 다섯 단계의 과정을 거친다. Canny 경계선 검출 알고리즘에 대하여 각 단계별 결과의 예를 그림 5에 나타내었다.

1) 1단계: 위에서 보인 그림 3과 같이 관심 변수를 변화시키면서 의미있는 경계선이 존재하는 영상과 의미있는 경계선이 존재하지 않는 영상을 각각 50개씩 생성한다. 생성되어진 영상들은 경계선 검출 알고리즘의 입력으로서 제공되어 관심 변수의 영향을 받으며 의미있는 경계선이 존재하는 영상과 의미있는 경계선이 존재하지 않고 관심 변수의 영향을 받는 영상에 대하여 의미있는 경계선 검출 영역에서의 경계선 검출 알고리즘에 의해 경계선으로 검출된 화소의 총수를 출력 값으로 생성한다. 총 100개의 실험 영상에 대하여 경계선으로 검출된 화소의 수를 x축으로 하고 대응하는 경계선 화소의 수를 출력한 영상의 수를 y축으로 하여 그래프를 얻는다(그림 5 (a)).

2) 2단계: 1단계에서 생성된 영상의 수 대 경계선으로 검출된 화소의 총수의 그래프로부터 P(미검출) 대 P(잘못된 검출)의 곡선(그림 5 (b))을 생성한다. P(미검출)은 의미있는 경계선이 있는 영상인데 의미있는 경계선이 없다고 판단한 영상의 총수로 의미있는 경계선을 포함한 입력 영상의 총수로 나눈 값이고, P(잘못된 검출)은 의미있는 경계선이 없는 영상인데 의미있는 경계선이 있는 영상으로 판단한 영상의 총수로 의미있는 경계선을 포함하지 않는 입력 영상의 총수로 나눈 값으로 구할 수 있다.

3) 3단계: 3단계에서는 1단계의 영상에 경계선 음영값 차이의 값을 변화한 입력 영상에 대하여 1, 2 단계를 되풀이하여 P(미검출) 대 P(잘못된 검출)의 곡선을 경계선 음영값 차이의 여러 가지 값 각각에 대하여 생성한다. 각 알고리즘간의 성능 평가 비교가 되는 경계선 음영값 차이를 구하기 위해 일정한 경계선 검출 에러율(P_e)을 갖는 경계선 음영값 차이 값을 구한다. 에러율 P_e 는 $(P(\text{미검출}) + P(\text{잘못된 검출})) / 2$ 로 정의하였고, 실험에서는 P_e 를 25%로 고정하였다. 즉, 경계선 검출 알고리즘의 검출 성능을 경계선 검출 에러율 25%로 고정시킨 상태에서 성능 비교를 위해 필요한 경계선 음영값 차이를 구한다(그림 5 (c)).

4) 4단계: 1단계의 영상에 관심 변수를 변화시키면서 생성한 입력 영상에 대하여 위의 1, 2, 3 단계를 되풀이하여 관심 변수 대 의미있는 경계선 검출에 필요한 경계선 음영값 차이의 성능 곡선(그림 5 (d))을 얻는다.

5) 5단계: 관심 변수가 변하지 않는 영상을 생성하여 P_e 가 25%일 때의 성능 곡선을 4단계의 결과로 생성한다. 관심 변수의 영향을 받은 성능 곡선과 관심 변수의 영향을 받지 않는 성능 곡선으로부터 제한한 정량적 성능 평가의 기준인 평균 평가 지수를 계산한다(표 1).

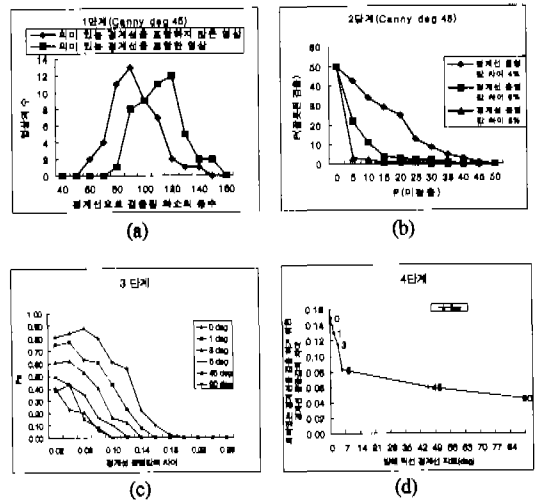


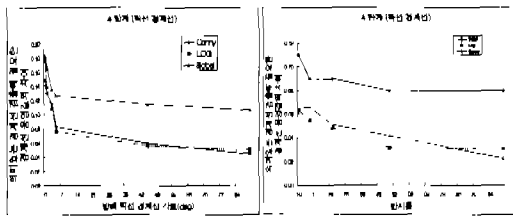
그림 5. 가우시안 잡음일 때의 Canny 경계선 검출 알고리즘의 1, 2, 3, 4단계 곡선

a) 방해 직선 경계선 각도 45° 일 때의 Canny 경계선 검출 알고리즘의 1단계 곡선, (b) 방해 직선 경계선 각도 45° 일 때의 Canny 경계선 검출 알고리즘의 2단계 곡선, (c) Canny 경계선 검출 알고리즘의 3단계 곡선, (d) Canny 경계선 검출 알고리즘의 4단계 성능 곡선

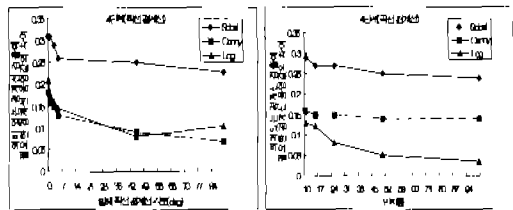
IV. 실험 결과

그림 6은 각 경계선 검출 알고리즘에 대한 본 연구의 성능 평가 방법을 적용하여 얻은 결과이다. 그림 6의 (a)와 (b)는 가우시안 잡음이 첨가된 실험 영상의 결과를 나타내며 (c)와 (d)는 첨가된 잡음이 임펄스 잡음일 때의 실험결과를 나타낸다. 그림 6 (a)와 (c)는 직선 경계선 검출 실험 결과로서 관심이 되는 직선 경계선 검출을 방해하는 주변의 다른 직선 경계선의 각도 변화에 따른 세 가지 경계선 검출 알고리즘의 성능 곡선(4단계의 결과로 얻어진

곡선)이다. 그림 6 (b)와 (d)는 곡선 경계선 검출 실험 결과로서 곡선 경계선의 곡률 변화에 따른 세 가지 경계선 검출 알고리즘의 성능 곡선이다. 실험 결과 그래프로부터 첨가된 잡음이 종류가 가우시안 잡음인 영상에 대한 직선 경계선과 곡선 경계선을 검출함에 있어서 LOG와 Canny 경계선 검출 알고리즘이 Sobel 보다 우수함을 가지적으로 알 수 있으나 LOG와 Canny 경계선 검출 알고리즘간의 평균 성능의 가지적인 비교는 용이하지 않음을 알 수 있다. 이 두 알고리즘의 평균적인 성능 비교는 본 논문에서 제안한 평균 평가 지수물 적용함으로써 가능하다.



(a) 가우시안 잡음인 경우 (b) 가우시안 잡음의 경우



(c) 임펄스 잡음의 경우 (d) 임펄스 잡음의 경우

그림 6. 관심 변수가 방해 직선 경계선의 각도일 때와 곡선 경계선의 곡률일 때의 4단계 성능 곡선

(a) 가우시안 잡음이 첨가된 방해 직선 경계선의 각도 변화에 의한 각 알고리즘의 4단계 성능 곡선, (b) 가우시안 잡음이 첨가된 곡률 변화에 의한 각 알고리즘의 4단계 성능 곡선, (c) 임펄스 잡음이 첨가된 방해 직선 경계선의 각도 변화에 의한 각 알고리즘의 4단계 성능 곡선, (d) 임펄스 잡음이 첨가된 곡률 변화에 의한 각 알고리즘의 4단계 성능 곡선

표 2는 두 알고리즘에 대한 평균 평가 지수물 계산한 결과를 나타내며 직선 경계선 검출 실험의 경우에는 Canny 경계선 검출 알고리즘이 LOG 경계선 검출 알고리즘보다 약간 우수함을 알 수 있다. 또한 첨가된 잡음이 임펄스 잡음인 실험 영상에 대한 결과는 곡선 경계선을 검출함에 있어서 LOG 경계선 검출 알고리즘이 Canny 경계선 검출 알고리즘보다 우수함을 알 수 있다. 가우시안 잡음이 적용된 경우와 결과가 다른 이유는 다음과 같다. Canny 경

계선 검출 알고리즘은 이중 임계치 연산(double thresholding)을 거쳐 생성된 경계선 영상들을 링크(link)하는 처리과정이 있다. 이러한 처리과정은 임펄스 잡음이 첨가된 곡선 경계선이 존재하는 실험 영상(즉, 의미있는 경계선이 존재하는 경우)일 경우 낮은 경계선 음영값 차이에서 생성된 경계선 영상을 링크를 함으로써 곡선 경계선이 존재하지 않는 영상(즉, 의미있는 경계선이 존재하지 않은 경우)에서 얻은 경계선 영상과 ROI(region of interest)에서 경계선으로 검출된 화소의 총수가 비슷하게 나오게 되며 결과적으로 의미있는 경계선을 검출하지 못하는 원인이 된다.

표 1. 경계선 검출 알고리즘에 대한 평균 평가 지수

관심변수 \ 알고리즘	가우시안 잡음이 첨가된 경우			임펄스 잡음이 첨가된 경우		
	Sobel	Canny	LOG	Sobel	Canny	LOG
방해직선 경계선의 각도 변화	0.131	0.088	0.101	0.247	0.097	0.100
곡선 경계선의 곡률 변화	0.094	0.043	0.044	0.248	0.143	0.045

그림 7은 반지름이 100픽소이고 경계선 음영값 차이가 평균값의 15%인 곡선 경계선이 포함된 실험 영상에 각 경계선 검출 알고리즘을 적용한 최적화된 결과 영상이다. 위의 결과 영상들은 각 알고리즘의 성능을 평가하기 위한 입력들로서 제공된다. 최적화된 결과 영상을 얻기 위하여 각 경계선 검출 알고리즘의 임계값은 다음과 같은 과정을 통하여 결정된다. 우선 임의의 임계값들을 적용한 결과 영상 중 육안에 의해 가장 우수하게 판별되는 임계값들을 선택한다. 그 후 선택된 각 임계값들에 대하여 본 논문이 제안한 위의 4단계 성능 곡선을 이용한 방법을 반복적으로 적용하여 가장 우수한 성능 곡선을 나타내는 임계값을 최종적으로 선택한다. 그와 같은 임계값 선택은 각 알고리즘에 최적화된 동일한 기준의 성능을 제공함으로써 좀 더 객관적인 성능 평가를 가능하게 해준다.



(a)



(b)



그림 7. 결과 영상(가우시안 잡음인 경우)

(a) 곡선 경계선 실험 영상, 반지름: 100화소, 경계선 윤영값 차이: 평균값의 15% (b) Canny 경계선 검출 알고리즘을 적용한 결과 영상, (c) LOG 경계선 검출 알고리즘을 적용한 결과 영상, (d) Sobel 경계선 검출 알고리즘을 적용한 결과 영상

V. 결 론

본 연구에서는 경계선 검출 알고리즘의 성능에 영향을 미칠 수 있는 관심 변수를 변화시키면서 경계선 검출 알고리즘의 성능을 정량적으로 측정하는 방법을 제안하였다. 그러나 인간에 의한 주관적인 정성적인 평가방법도 경계선 검출 성능을 측정하는 주된 수단이기 때문에 정량적인 방법과 함께 연구되어 두 가지 평가방법이 상호 보완적인 역할을 하도록 하여야 한다. 본 연구에서는 두 가지 연구 방법 중 정량적인 평가방법에 초점을 두어 컴퓨터 시각 분야에서 표준으로 사용되는 세 가지 경계선 검출 알고리즘인 Sobel, LOG(Laplacian of Gaussian), Canny 경계선 검출 알고리즘에 대하여 제안한 방법을 직선 경계선과 곡선 경계선 검출에 대하여 가우시안 잡음과 임펄스 잡음 각각을 첨가하여 생성한 잡음 영상에 적용하여 실험 평가하였다. 이러한 경계선 검출 알고리즘 성능 평가 방법은 영상내 직선 검출이나 곡선 검출에 대한 각 알고리즘의 성능을 평가하여 공장과 같은 제한적인 환경에서의 주로 단순한 직선과 곡선으로 이루어진 기계 부품들에 대한 경계선 검출과 같은 특정 목적에 적합한 최적의 경계선 검출 알고리즘을 선택할 수 있도록 하여 준다.

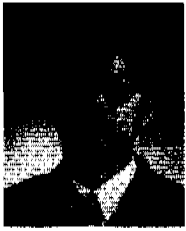
참 고 문 헌

[1] I. E. Sobel, Camera Models, "Machine perceptions," Ph. D. thesis, Stanford University, 1970
 [2] A. Huertas, G. Medioni, "Detection of intensity changes with sub-pixel accuracy using Laplacian-Gaussian masks," *IEEE Trans.*

Pattern Analysis and Machine Intelligence, PAMI-8(5), pp. 651-664, September 1986.
 [3] J. F. Canny, "A computational approach to edge detection," *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-8(6), pp. 679-698, November 1986.
 [4] Ikaram. E. Abdou, William. K. Pratt, "Quantitative design and evaluation of enhancement/thresholding edge detectors," *Proceedings of The IEEE*, Vol. 67, No. 5, May 1979.
 [5] Jerry. R. Fram, Edwards. Deutsch, "On the quantitative evaluation of edge detection schemes and their comparison with human performance," *IEEE Trans. on Computers*, Vol. C-24, No. 6, June 1975.
 [6] G. F. McLean, M. E. Jernigan, "Hierarchical edge detection," *Computer Vision, Graphics and Image Processing* 44, July 1988.
 [7] Les Kitchen, Azriel Rosenfeld, "Edge evaluation using local edge coherence," *IEEE Trans. on System, Man, and Cybernetics*, Vol. 11, No. 9, September 1981.
 [8] M. Y. Jaisimha, John Palmer, Robert M. Haralick, "A methodology for the quantitative performance evaluation of detection algorithms," *IEEE Trans. on Image Processing*, Vol. 4, No. 12, December 1995.
 [9] Michael D. Heath, Sudeep Sarkar, Thomas Sanocki, Kevin W. Bowyer, "A robust visual method for assessing the relative performance of edge detector algorithms," *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 19, No. 12, December 1997.
 [10] Donald E. Knuth, *The art of computer programming: Seminumerical Algorithms*, pp. 117-118, Addison-Wesley Publishing Company, 1981.

양희성(Hee-Sung Yang) 학생회원

1999년 2월: 성균관대학교 제어계측공학과 학사



1999년 3월~현재: 성균관대학교
전기전자 및 컴퓨터공학부
석사과정

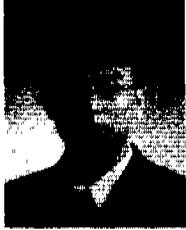
<주관심 분야> 컴퓨터비전,
영상처리, 신경망

조교수

1995년~현재: 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학
부 부교수

<주관심 분야> 소프트웨어공학, 전자상거래, HCI,
에이전트지향 지능형시스템, 인공지능응용

김유호(Yu-Ho Kim) 학생회원



1999년 2월: 성균관대학교
제어계측공학과 학사

1999년 3월~현재: 성균관대학교
전기전자 및 컴퓨터공학부
석사과정

<주관심 분야> 컴퓨터비전,
컴퓨터 그래픽스, 네트워크

정회원

1985년: 서울대학교 전기공학과
학사

1987년: The Pennsylvania State
Univ. Dept. of Elec.
Engr. 석사

1989년 3월~1989년 11월:
삼성종합기술원 연구원

1994년: Purdue Univ. School of Elec. Engr. 박사
1994년 9월~1995년 10월: University of California,
Riverside 연구원

1995년 11월~1997년 2월: 한국과학기술원
선임연구원

1997년 3월~현재: 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터
공학부 조교수

<주관심 분야> 컴퓨터 비전, 영상처리, 인공지능,
멀티미디어 시스템

한정현(Jung-Hyun Han) 정회원



1988년: 서울대학교
컴퓨터공학과 학사

1991년: 미국 University of
Cincinnati 전산학과 석사

1996년: 미국 University of
Southern California 박사

1996년~1997년: 미국 상무성 National Institute of
Standards and Technology 연구원

1997~현재: 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부
조교수

<주관심 분야> 컴퓨터 그래픽스, 컴퓨터 비전,
인공지능

이은석(Eun-Seok Lee) 정회원



1985년: 성균관대학교
전자공학과 학사

1988년: 일본 Tohoku(동북)대학
교 정보공학과 석사

1991년: 일본 Tohoku(동북)대학
교 정보공학과 박사

1992년~1993년: 일본 미쯔비시 정보전자연구소
특별연구원

1994년: 일본 Tohoku(동북)대학교 전기통신연구소