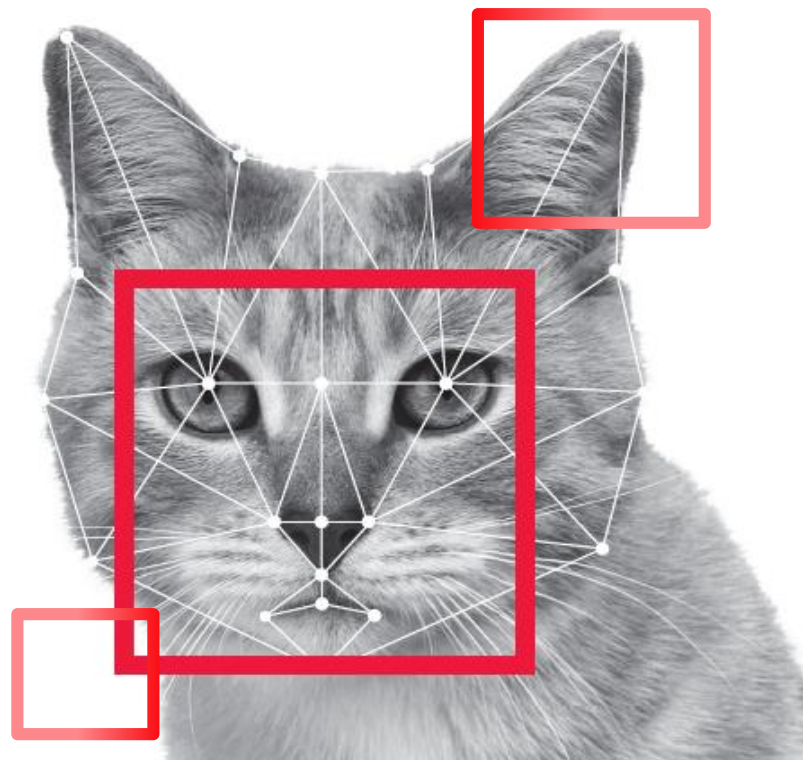


COMPUTER VISION 컴퓨터 비전

기본 개념부터 최신 모바일 응용 예까지



3장. 에지 검출

PREVIEW

■ 에지의 유용성

- 물체의 경계를 표시해 줌
- 매칭에 용이한 선분이나 곡선으로 변환 가능

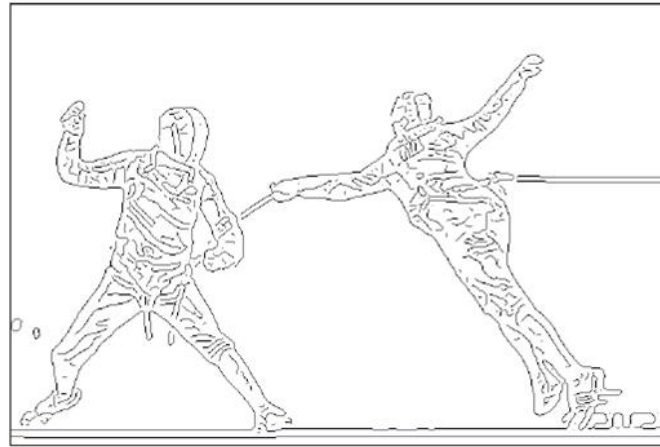


그림 3-1 원래 영상과 에지 영상

■ 에지의 한계

- 실종된 에지 (거짓 부정), 거짓 에지 (거짓 긍정) 발생
- 이들 오류를 어떻게 최소화할 것인가?

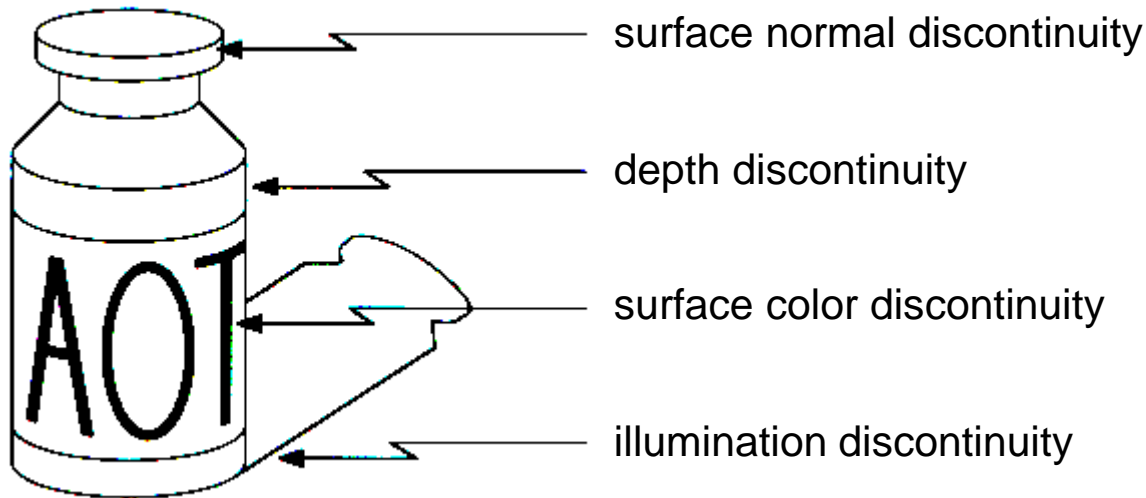
각 절에서 다루는 내용

1. 에지 검출의 기초
2. 영교차 이론
3. 캐니 에지
4. 컬러 에지
5. 선분 검출

3.1 에지 검출의 기초

■ 원리

- 물체 내부나 배경은 변화가 없거나 작은 반면, 물체 경계는 변화가 큼
- 이 원리에 따라 에지 검출 알고리즘은 명암, 컬러, 또는 텍스처의 변화량을 측정하고, 변화량이 큰 곳을 에지로 검출



3.1 에지 검출의 기초

3.1.1 디지털 영상의 미분

3.1.2 에지 모델과 연산자

3.1.3 에지 강도와 에지 방향

3.1.1 디지털 영상의 미분

■ 1차원

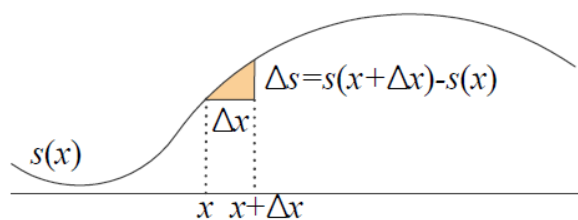
- 연속 공간에서 미분

$$s'(x) = \frac{ds}{dx} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{s(x + \Delta x) - s(x)}{\Delta x} \quad (3.1)$$

- 디지털 (이산) 공간에서 미분

$$f'(x) = \frac{df}{dx} = \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} = f(x + 1) - f(x) \quad (3.2)$$

이에 해당하는 마스크 = $\begin{bmatrix} -1 & 1 \end{bmatrix}$ ← 에지 연산자



(a) 연속 함수의 미분

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	2	3	2	3	5	9	9	8	9
0	1	-1	1	2	4	0	-1	1	-
0	0	0	0	0	1	0	0	0	-

디지털 영상 f

f 의 도함수 f'

$|f'|$ 의 이진화

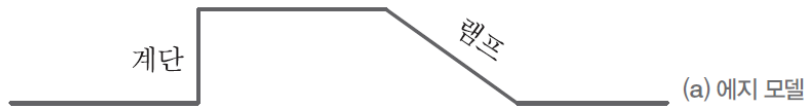
(b) 디지털 영상의 미분

그림 3-2 미분과 에지 검출

3.1.2 에지 모델과 연산자

■ 계단 에지와 램프 에지

- 자연 영상에서는 주로 램프 에지가 나타남



0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
2	2	2	2	6	6	6	6	5	4	3	2	2	2

(b) 디지털 영상 f

0	0	0	4	0	0	0	-1	-1	-1	-1	0	0	-
---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	---	---	---

(c) f 의 1차 도함수 f'

0	0	4	-4	0	0	0	-1	0	0	1	0	-	-
---	---	---	----	---	---	---	----	---	---	---	---	---	---

(d) f 의 2차 도함수 f''

그림 3-3 에지 모델

■ 2차 미분

$$\begin{aligned}f''(x) &= \frac{d^2f}{dx^2} = f'(x) - f'(x-1) \\&= (f(x+1) - f(x)) - (f(x) - f(x-1)) \\&= f(x+1) + f(x-1) - 2f(x)\end{aligned}\tag{3.3}$$

이에 해당하는 마스크 =

1	-2	1
---	----	---

3.1.2 에지 모델과 연산자

■ 램프 에지에서 미분의 반응

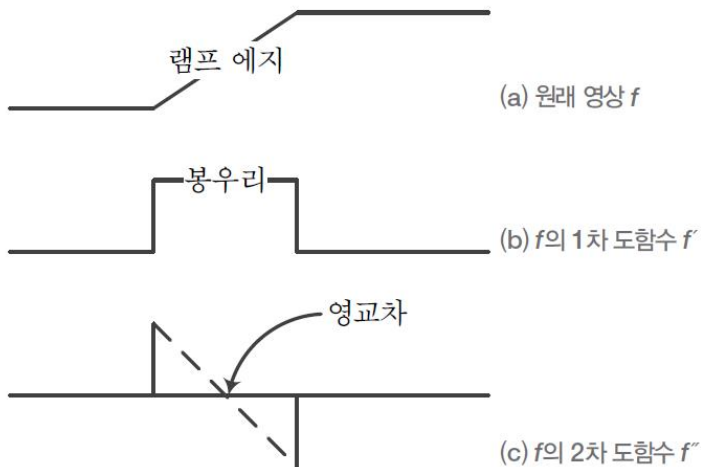


그림 3-4 램프 에지에서 1차와 2차 미분의 반응

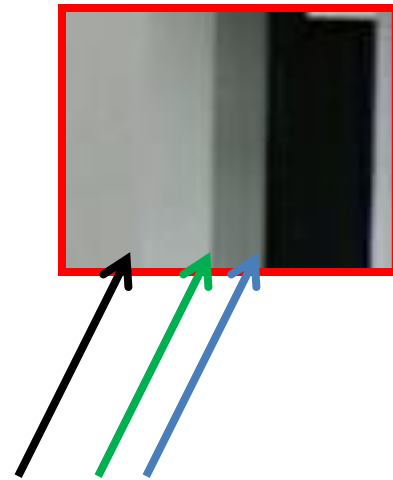
■ 에지 검출 과정

- 1차 미분에서 봉우리 또는 2차 미분에서 영교차를 찾음
- 두꺼운 에지에서 위치 찾기 적용

Closeup of edges



Closeup of edges



Closeup of edges

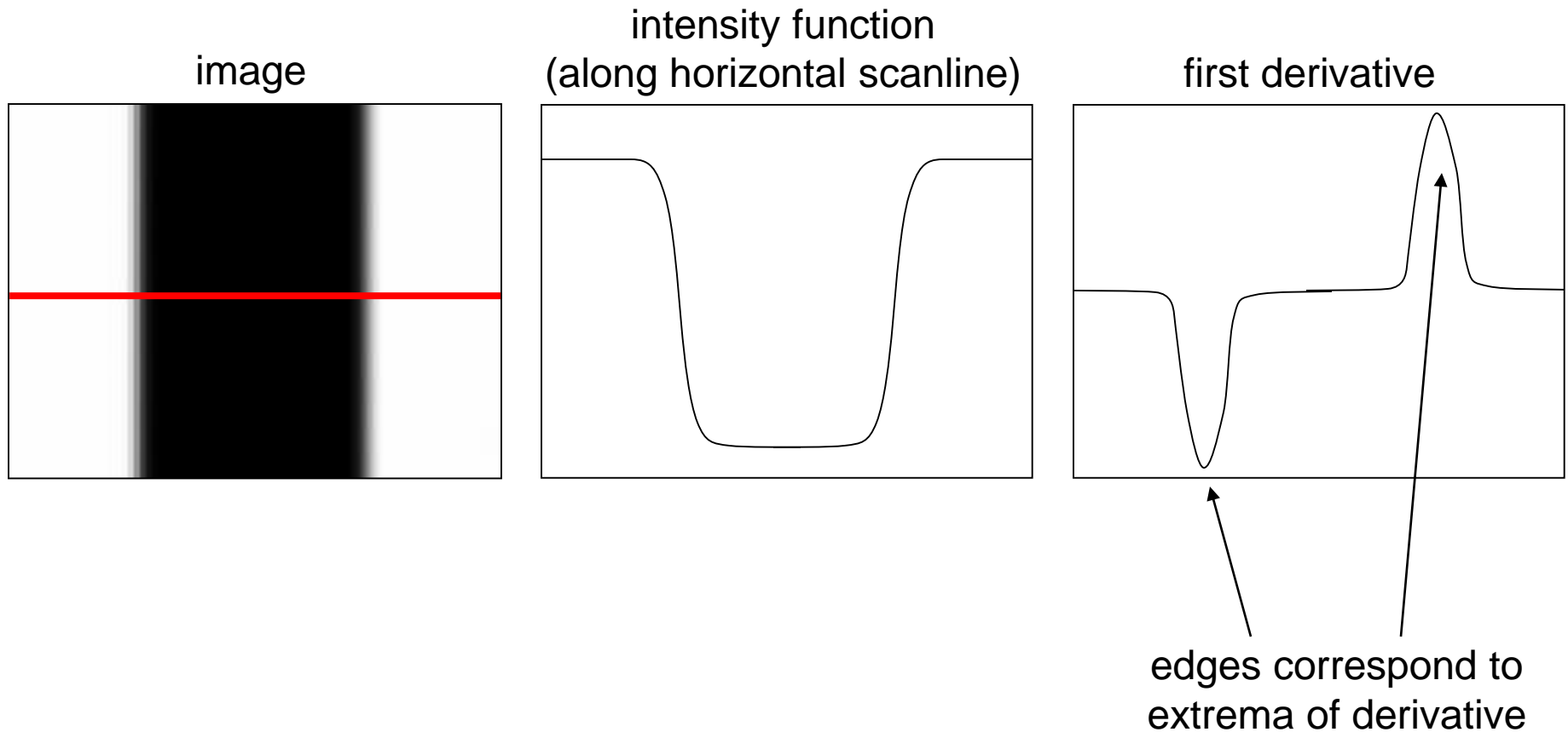


Closeup of edges

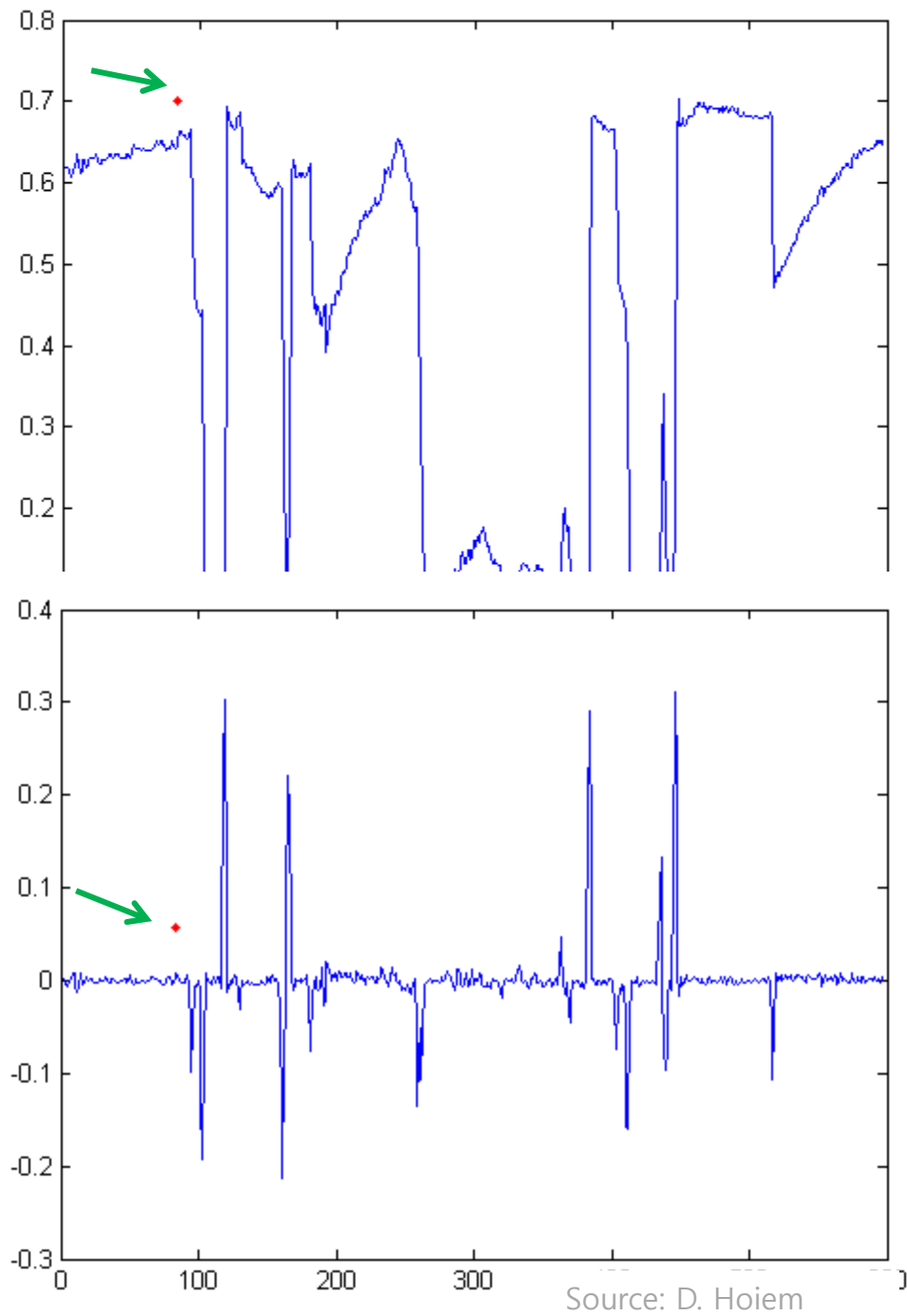
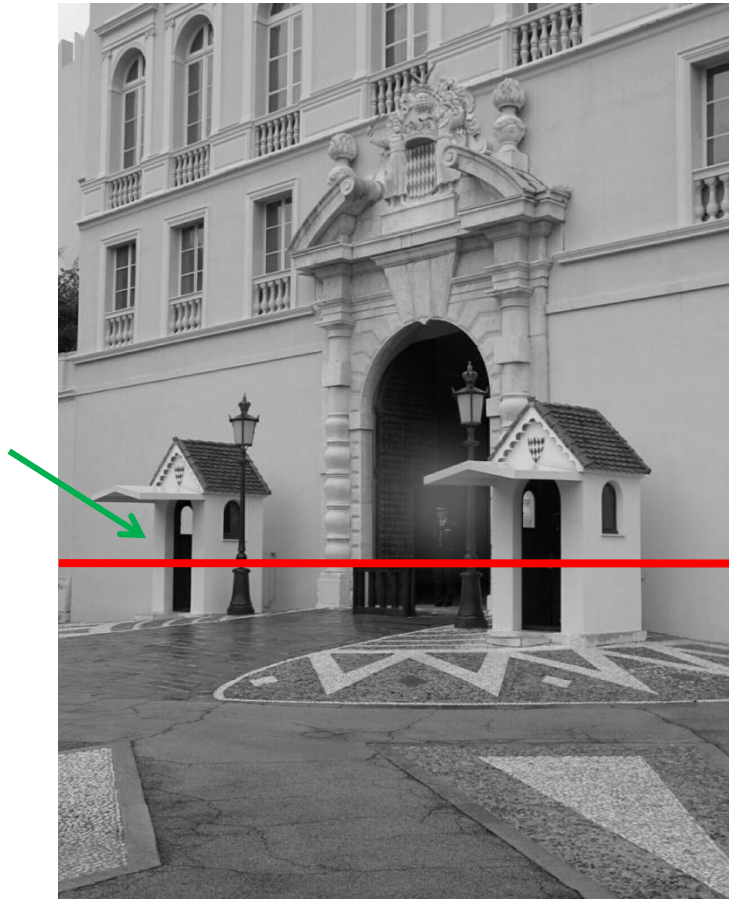


Characterizing edges

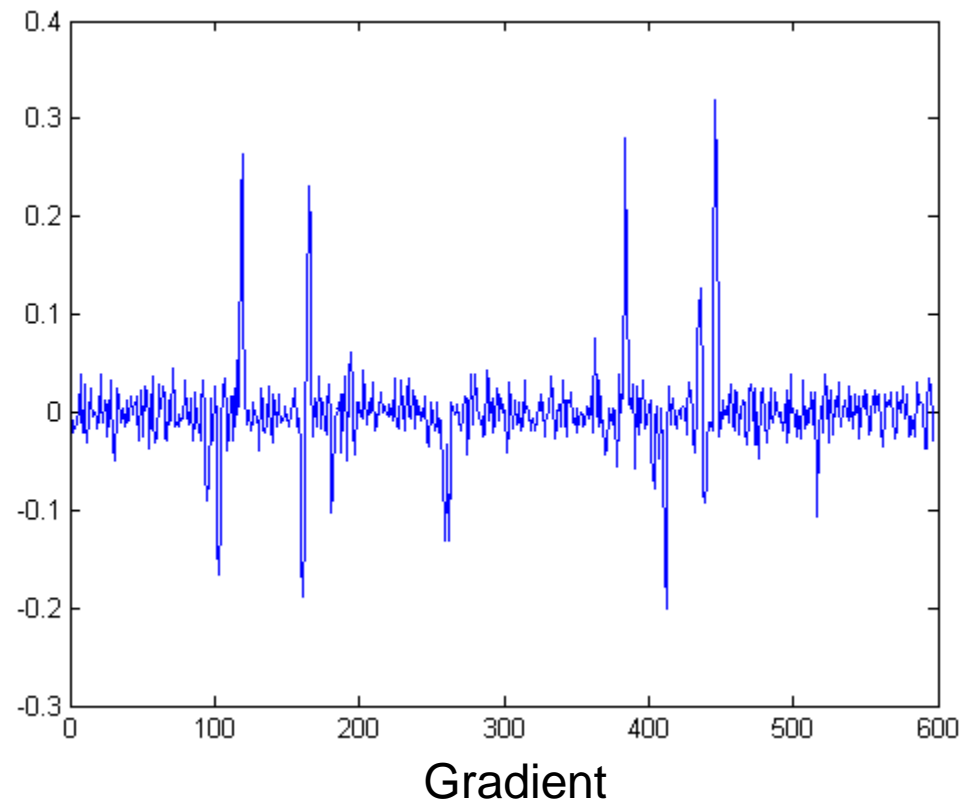
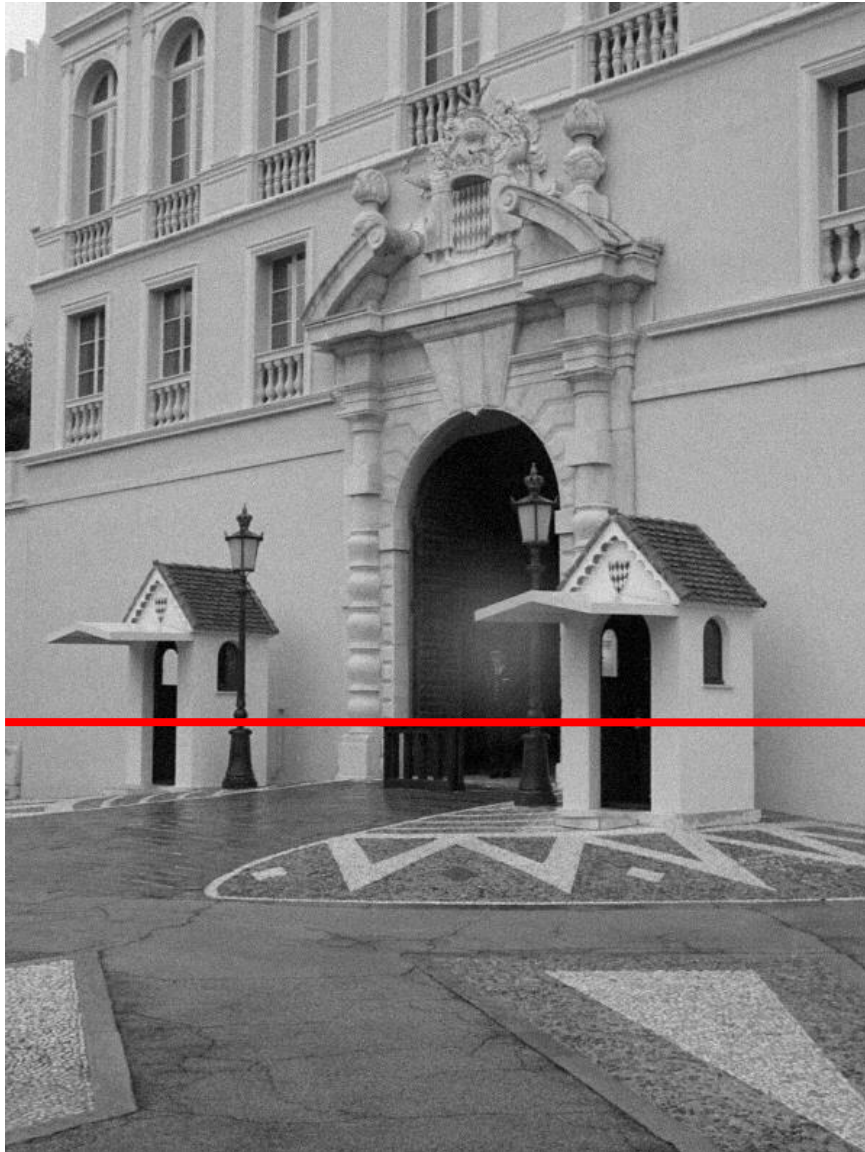
- An edge is a place of rapid change in the image intensity function



Intensity profile



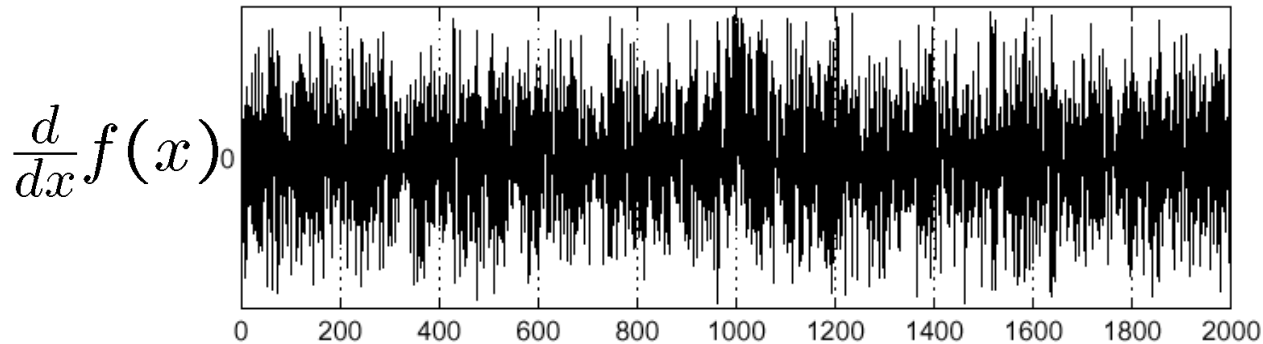
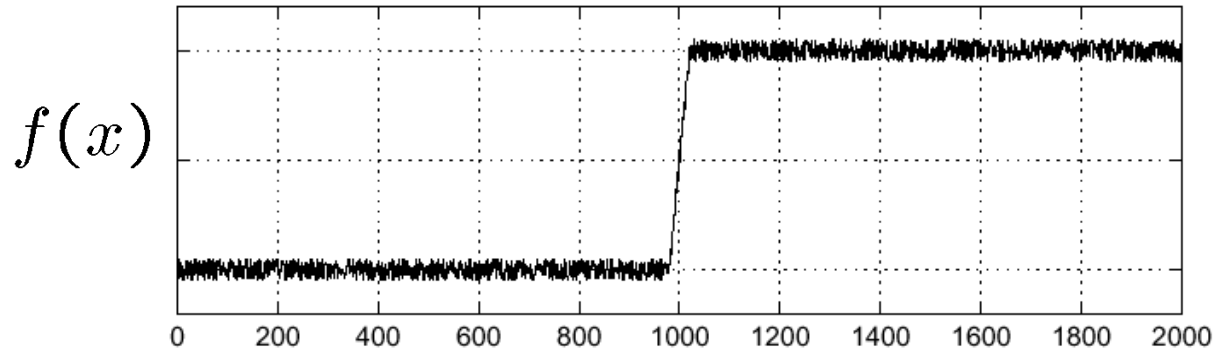
With a little Gaussian noise



Source: D. Hoiem

Effects of noise

- Consider a single row or column of the image
 - Plotting intensity as a function of position gives a signal

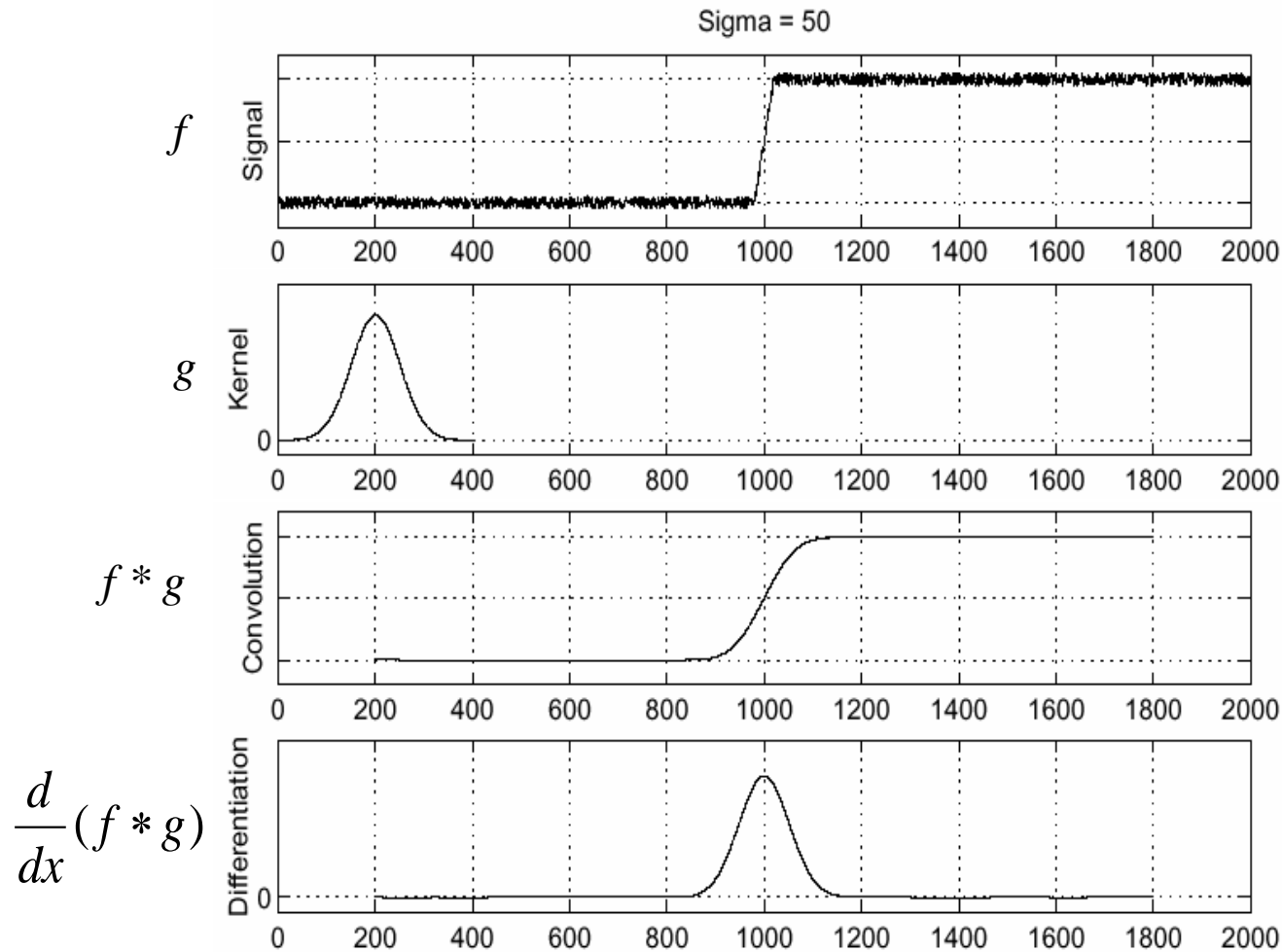


Where is the edge?

Effects of noise

- Difference filters respond strongly to noise
 - Image noise results in pixels that look very different from their neighbors
 - Generally, the larger the noise the stronger the response
- What can we do about it?

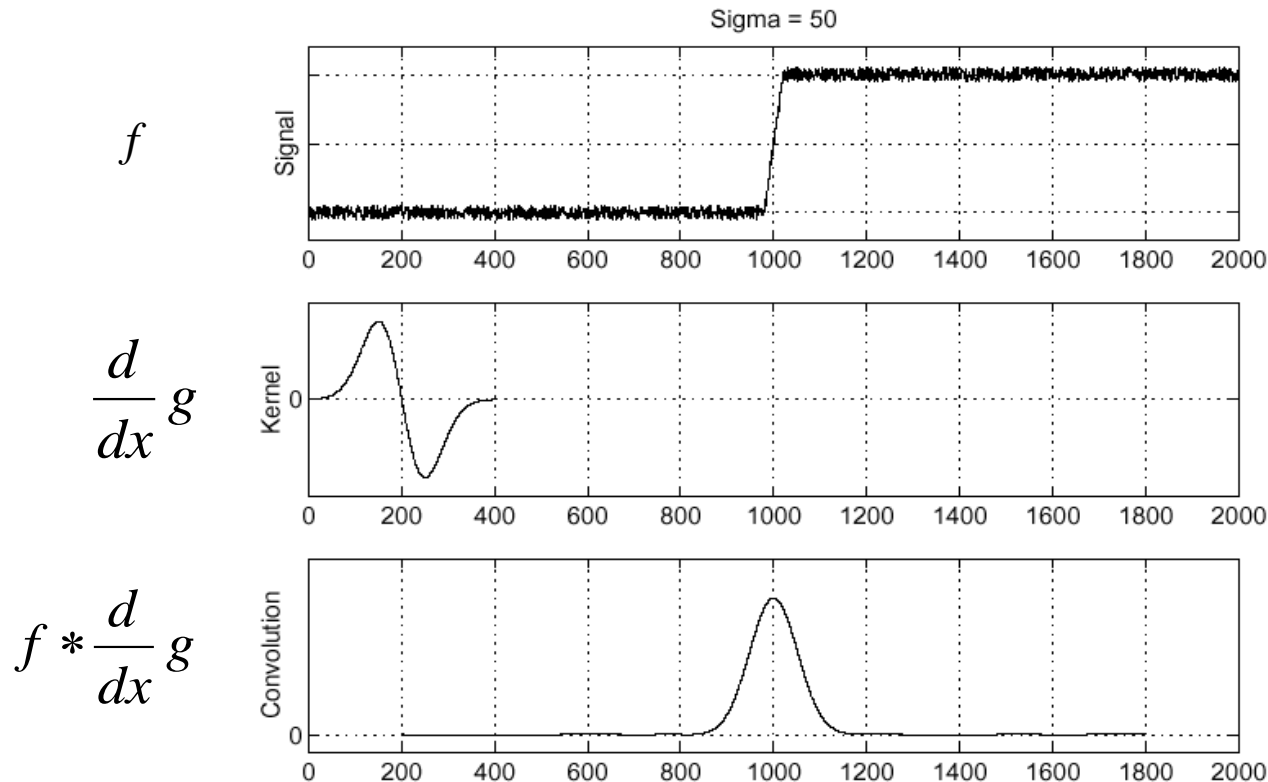
Solution: smooth first



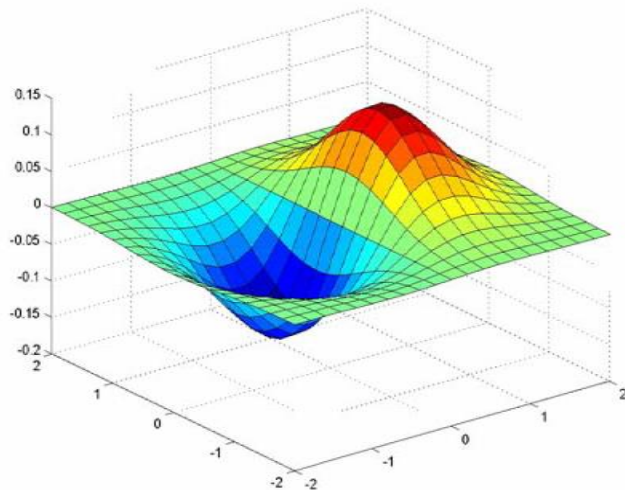
- To find edges, look for peaks in $\frac{d}{dx}(f * g)$

Derivative theorem of convolution

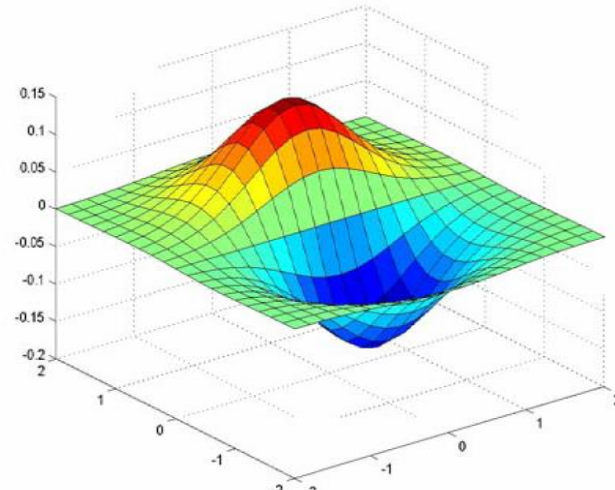
- Differentiation is convolution, and convolution is associative: $\frac{d}{dx}(f * g) = f * \frac{d}{dx}g$
- This saves us one operation:



Derivative of Gaussian filter



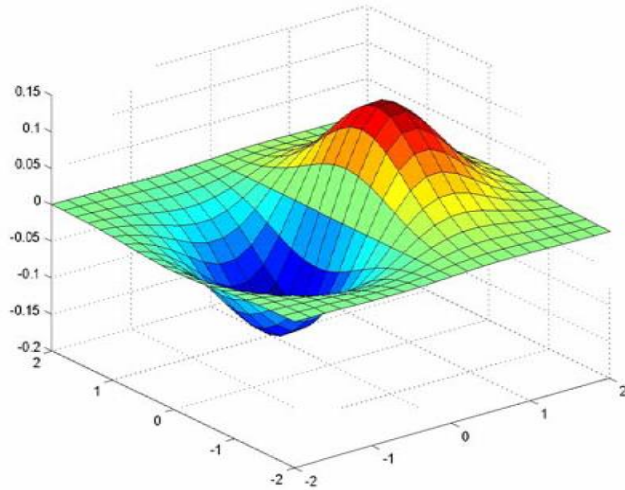
x -direction



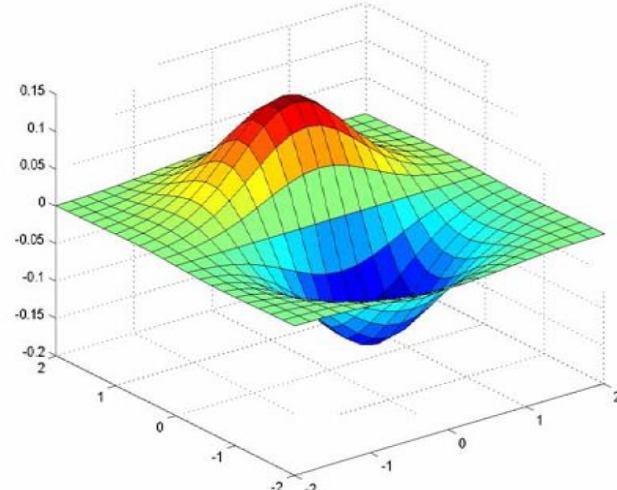
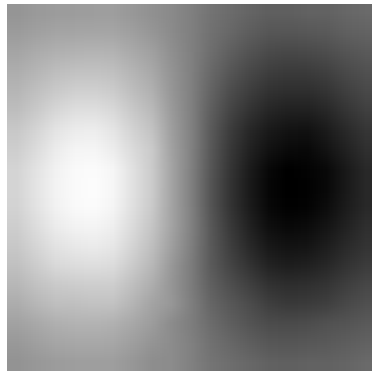
y -direction

■ Are these filters separable?

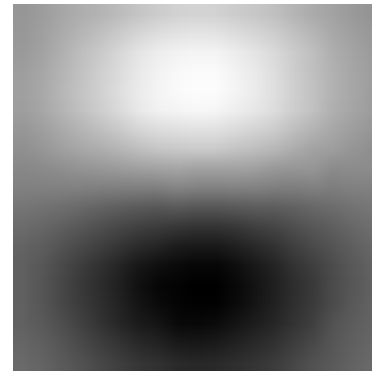
Derivative of Gaussian filter



x -direction



y -direction



- Which one finds horizontal/vertical edges?
- ?

3.1.2 에지 모델과 연산자

■ 현실에서는,

- 잡음 때문에 스무딩 필요

- 예) 100 100 100 100 170 170 170 ... → 98 97 101 102 168 170 169 ...

- $\Delta x=2$ 인 연산자로 확장

$$f'(x) = \frac{df}{dx} = \frac{f(x+1) - f(x-1)}{2} \quad (3.4)$$

이에 해당하는 마스크 =

-1	0	1
----	---	---

- 2차원으로 확장

$$\nabla f(y, x) = \left(\frac{\partial f}{\partial y}, \frac{\partial f}{\partial x} \right) = (d_y, d_x) = (f(y+1, x) - f(y-1, x), f(y, x+1) - f(y, x-1)) \quad (3.5)$$

이에 해당하는 마스크: $m_y =$

-1
0
1

 $, m_x =$

-1	0	1
----	---	---

3.1.2 에지 모델과 연산자

■ 정방형으로 확장하여 스무딩 효과

<table><tr><td>0</td><td>-1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td></tr></table> m_y	0	-1	1	0	<table><tr><td>-1</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td></tr></table> m_x	-1	0	0	1	<table><tr><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table> m_y	-1	-1	-1	0	0	0	1	1	1	<table><tr><td>-1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>-1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>-1</td><td>0</td><td>1</td></tr></table> m_x	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	<table><tr><td>-1</td><td>-2</td><td>-1</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>2</td><td>1</td></tr></table> m_y	-1	-2	-1	0	0	0	1	2	1	<table><tr><td>-1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>-2</td><td>0</td><td>2</td></tr><tr><td>-1</td><td>0</td><td>1</td></tr></table> m_x	-1	0	1	-2	0	2	-1	0	1
0	-1																																																
1	0																																																
-1	0																																																
0	1																																																
-1	-1	-1																																															
0	0	0																																															
1	1	1																																															
-1	0	1																																															
-1	0	1																																															
-1	0	1																																															
-1	-2	-1																																															
0	0	0																																															
1	2	1																																															
-1	0	1																																															
-2	0	2																																															
-1	0	1																																															
(a) 로버츠		(b) 프레윗		(c) 소벨																																													

그림 3-5 에지 연산자

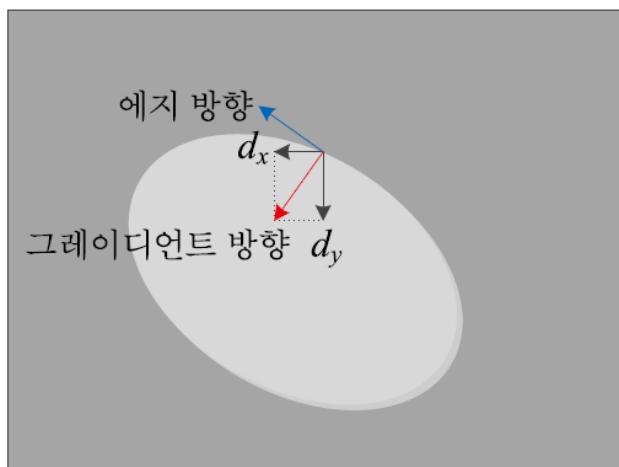
3.1.3 에지 강도와 에지 방향

■ 에지 검출 연산

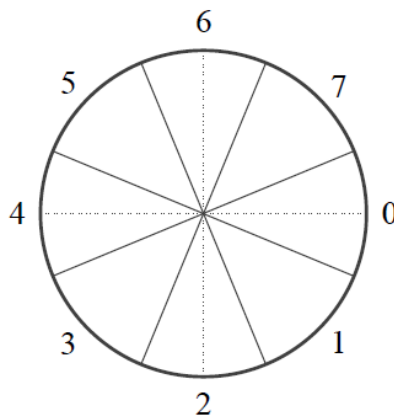
그레이디언트 : $\nabla f = \left(\frac{\partial f}{\partial y}, \frac{\partial f}{\partial x} \right) = (d_y, d_x)$

에지 강도 : $S(y, x) = \text{magnitude}(\nabla f) = \sqrt{d_y^2 + d_x^2}$ (3.6)

그레이디언트 방향 : $D(y, x) = \arctan\left(\frac{d_y}{d_x}\right)$

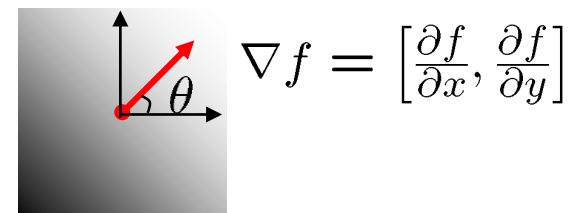
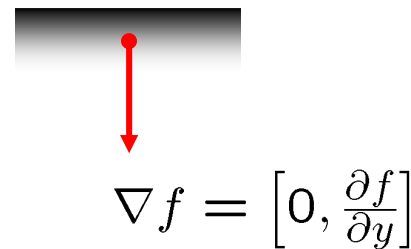
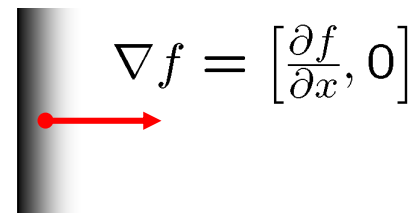


(a) 에지 방향과 그레이디언트 방향



(b) 에지 방향의 양자화

그림 3-6 에지 방향과 8-방향 양자화



3.1.3 에지 강도와 에지 방향

예제 3-1 소벨 마스크를 이용한 에지 검출

[그림 3-7]의 작은 예제 영상에 소벨 에지 연산자를 적용한다. (5,3)위치에 있는 화소에 대해서 앞에서 다룬 그레이디언트, 에지 강도, 에지 방향을 계산해 보자.

	0	1	2	3	4	5	6	7	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	$d_y = (0 \times 1 + 0 \times 2 + 1 \times 1) + (3 \times (-1) + 1 \times (-2) + 0 \times (-1)) = -4$
1	0	1	1	0	0	0	1	0	$d_x = (0 \times 1 + 4 \times 2 + 1 \times 1) + (3 \times (-1) + 2 \times (-2) + 0 \times (-1)) = 2$
2	0	1	2	0	0	0	1	0	
3	0	1	3	1	0	0	2	0	$S(5,3) = ((-4)^2 + 2^2)^{\frac{1}{2}} = 4.47$
4	0	1	3	1	0	0	2	0	$D(5,3) = \arctan(-\frac{4}{2}) = -63.4^\circ$
5	0	1	2	3	4	4	3	0	$\rightarrow d_y$ 와 d_x
6	0	0	0	0	1	3	1	0	\rightarrow 그레이디언트 방향
7	0	0	0	0	0	0	0	0	\rightarrow 에지 방향

그림 3-7 소벨 에지 검출 예

그레이디언트는 $\nabla f = (d_y, d_x) = (-4, 2)$ 이다. 식 (3.6)을 적용하면 에지 강도는 4.47이고, 그레이디언트 방향은 -63.4° 이다. 에지 방향은 그레이디언트 방향에 수직이므로 26.6° 이다. 에지 방향을 [그림 3-6(b)]에 따라 양자화하면 10이 된다.

3.1.3 에지 강도와 에지 방향



(a) 원래 영상



(b) 에지 강도



(c) d_y



(d) d_x

그림 3-8 에지 검출과 관련된 맵

3.2 영교차 이론

- 1980년에 Marr와 Hildreth가 개발 [Marr80]
 - 이전에는 주로 소벨을 사용

3.2.1 가우시안과 다중 스케일 효과

3.2.2 LOG 필터

3.2.1 가우시안과 다중 스케일 효과

■ 가우시안을 사용하는 이유

- 미분은 잡음을 증폭시키므로 스무딩 적용이 중요함

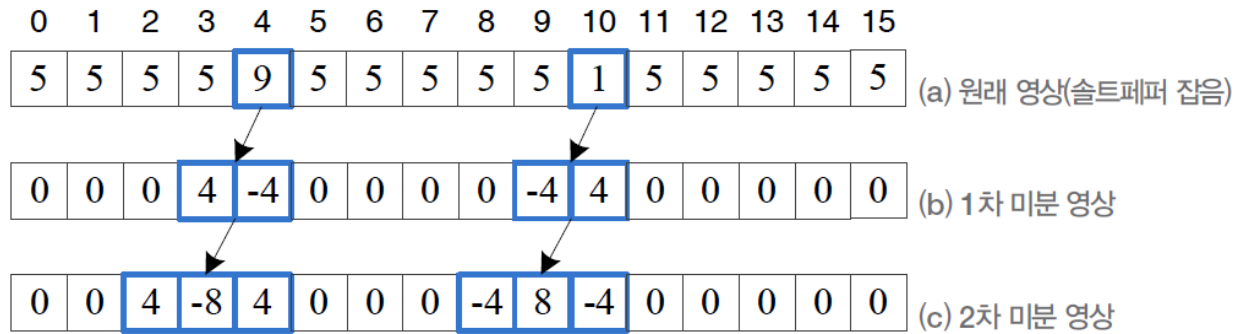


그림 3-9 미분에 의한 잡음 증폭

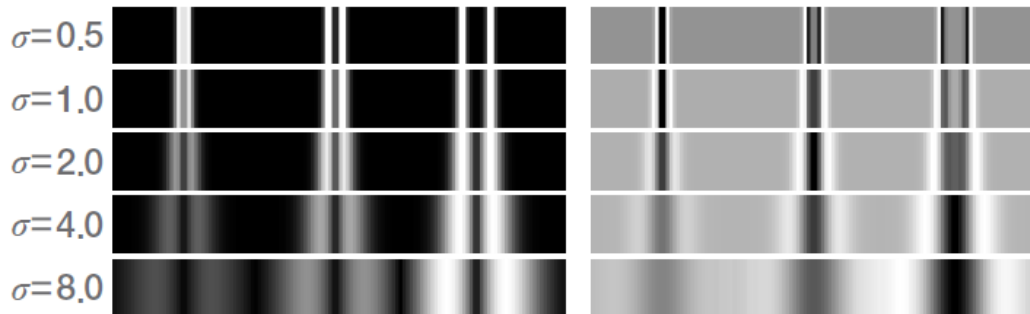
3.2.1 가우시안과 다중 스케일 효과

■ 가우시안을 사용하는 이유

- σ 를 조절하여 다중 스케일 효과
- 에지의 세밀함 조절 가능



(a) 원래 영상



(b) 1차 미분

(c) 2차 미분

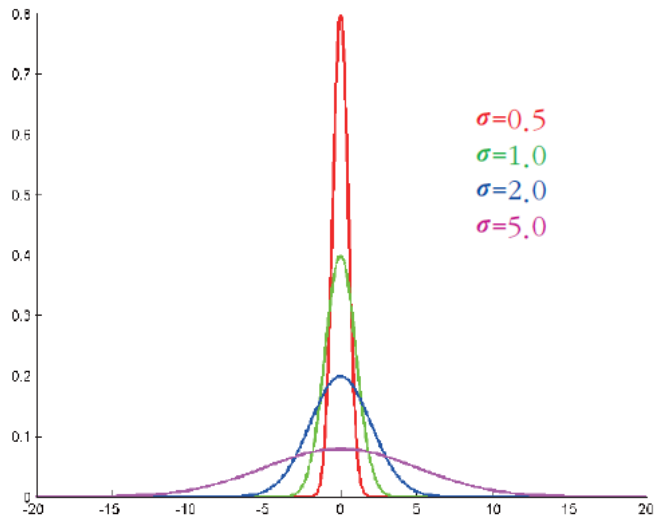
그림 3-10 다중 스케일 에지 효과

3.2.1 가우시안과 다중 스케일 효과

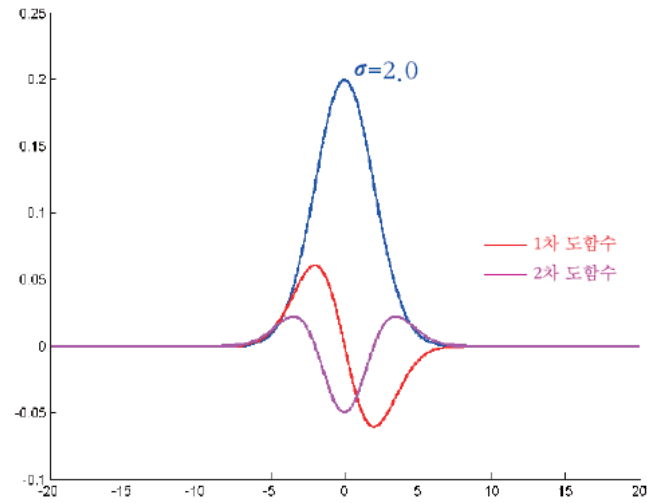
■ 가우시안

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (3.7)$$

■ σ 로 스케일 조절



(a) σ 에 따른 가우시안 함수



(b) 가우시안 함수의 미분

그림 3-11 가우시안 커널

3.2.1 가우시안과 다중 스케일 효과

■ 2차원 가우시안

$$G(y,x) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{y^2+x^2}{2\sigma^2}} \quad (3.8)$$

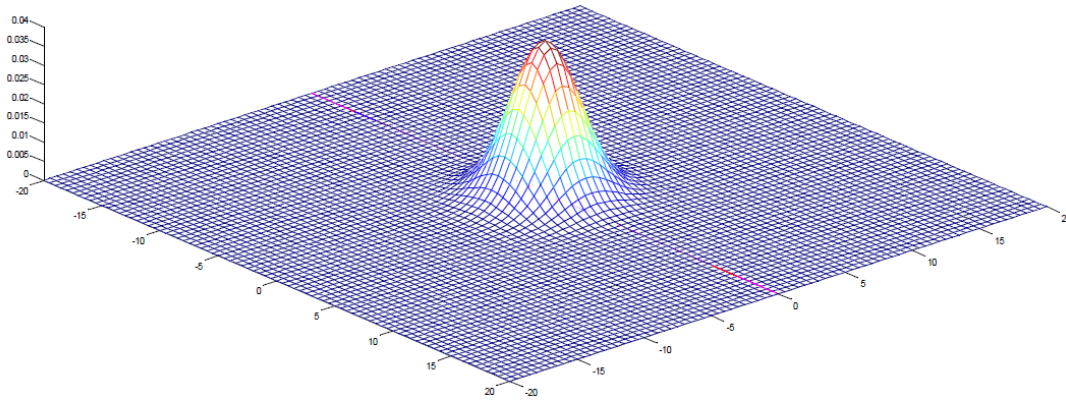


그림 3-12 2차원 가우시안 함수($\sigma=2.0$)

■ 이산 공간에서 구현

- 마스크 크기가 작으면 오차, 크면 계산 시간 과다
- 6σ 와 같거나 큰 가장 작은 홀수
 - 예) $\sigma=3.0$ 이면, 19×19 마스크 사용

3.2.2 LOG 필터

■ Marr-Hildreth 에지 검출 알고리즘 [Marr80]

- 2차 미분에서 영교차 검출

알고리즘 3-1 Marr-Hildreth 에지 검출

입력 : 영상 $f(j, i)$, $0 \leq j \leq M-1$, $0 \leq i \leq N-1$, 가우시안의 표준편차 σ

출력 : 에지 영상 $b(j, i)$, $0 \leq j \leq M-1$, $0 \leq i \leq N-1$ // 에지는 1, 비에지는 0인 이진 영상

- 1 σ 크기의 가우시안으로 입력 영상 f 를 스무딩한다.
- 2 결과 영상에 라플라시안 연산자를 적용하여 2차 미분을 구한다.
- 3 결과 영상에서 영교차를 찾아 에지로 설정하고, 나머지는 비에지로 설정한다.

■ 라플라시안 (2행)

$$\begin{aligned}\nabla^2 f(y, x) &= \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \\ &= (f(y+1, x) + f(y-1, x) - 2f(y, x)) + (f(y, x+1) + f(y, x-1) - 2f(y, x)) \\ &= f(y+1, x) + f(y-1, x) + f(y, x+1) + f(y, x-1) - 4f(y, x)\end{aligned}\quad (3.10)$$

이에 해당하는 필터 : $L =$

0	1	0
1	-4	1
0	1	0

3.2.2 LOG 필터

■ LOG 필터

- 입력 영상에 가우시안 G 를 적용한 후, 결과에 라플라시안을 다시 적용하는 두 단계의 비효율성
 - 계산 시간 과다
 - 이산화에 따른 오류 누적
- LOG 필터를 이용한 한 단계 처리

$$\text{LOG}(y, x) = \nabla^2 (G(y, x) \circledast f(y, x)) = (\nabla^2 G(y, x)) \circledast f(y, x) \quad (3.11)$$

$$\nabla^2 G(y, x) = \left(\frac{y^2 + x^2 - 2\sigma^2}{\sigma^4} \right) G(y, x) \quad (3.12)$$

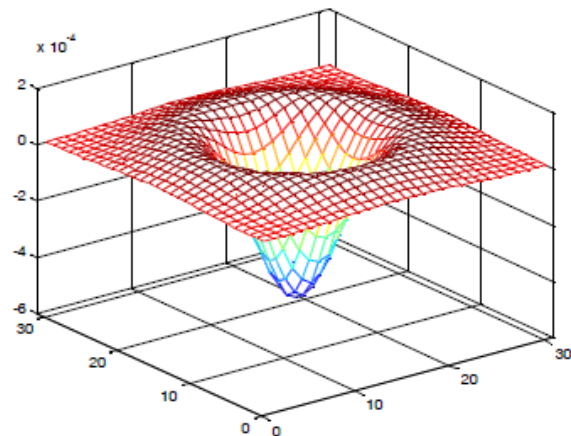
3.2.2 LOG 필터

0.4038 0.8021 0.4038
0.8021 -4.8233 0.8021
0.4038 0.8021 0.4038

(a) $\sigma=0.5$

0.0001	0.0001	0.0002	0.0004	0.0006	0.0007	0.0008	0.0007	0.0006	0.0004	0.0002	0.0001	0.0001
0.0001	0.0002	0.0005	0.0010	0.0014	0.0018	0.0019	0.0018	0.0014	0.0010	0.0005	0.0002	0.0001
0.0002	0.0005	0.0011	0.0019	0.0025	0.0027	0.0027	0.0027	0.0025	0.0019	0.0011	0.0005	0.0002
0.0004	0.0010	0.0019	0.0027	0.0025	0.0015	0.0008	0.0015	0.0025	0.0027	0.0019	0.0010	0.0004
0.0006	0.0014	0.0025	0.0025	0.0000	-0.0040	-0.0060	-0.0040	0.0000	0.0025	0.0025	0.0014	0.0006
0.0007	0.0018	0.0027	0.0015	-0.0040	-0.0116	-0.0154	-0.0116	-0.0040	0.0015	0.0027	0.0018	0.0007
0.0008	0.0019	0.0027	0.0008	-0.0060	-0.0154	-0.0199	-0.0154	-0.0060	0.0008	0.0027	0.0019	0.0008
0.0007	0.0018	0.0027	0.0015	-0.0040	-0.0116	-0.0154	-0.0116	-0.0040	0.0015	0.0027	0.0018	0.0007
0.0006	0.0014	0.0025	0.0025	0.0000	-0.0040	-0.0060	-0.0040	0.0000	0.0025	0.0025	0.0014	0.0006
0.0004	0.0010	0.0019	0.0027	0.0025	0.0015	0.0008	0.0015	0.0025	0.0027	0.0019	0.0010	0.0004
0.0002	0.0005	0.0011	0.0019	0.0025	0.0027	0.0027	0.0027	0.0025	0.0019	0.0011	0.0005	0.0002
0.0001	0.0002	0.0005	0.0010	0.0014	0.0018	0.0019	0.0018	0.0014	0.0010	0.0005	0.0002	0.0001
0.0001	0.0001	0.0002	0.0004	0.0006	0.0007	0.0008	0.0007	0.0006	0.0004	0.0002	0.0001	0.0001

(c) $\sigma=2.0$



(d) $\sigma=5.0$

그림 3-13 LOG 필터

3.2.2 LOG 필터

알고리즘 3-2 Marr-Hildreth 에지 검출(LOG 필터 사용)

입력 : 영상 $f(j,i)$, $0 \leq j \leq M-1$, $0 \leq i \leq N-1$, 가우시안의 표준편차 σ

출력 : 에지 영상 $b(j,i)$, $0 \leq j \leq M-1$, $0 \leq i \leq N-1$ // 에지는 1, 비에지는 0인 이진 영상

- 1 σ 크기의 LOG 필터를 입력 영상 f 에 적용한다.
- 2 결과 영상에서 영교차를 찾아 에지로 설정하고, 나머지는 비에지로 설정한다.

■ 영교차 검출 (2행)

1. 여덟 개의 이웃 중에 마주보는 동-서, 남-북, 북동-남서, 북서-남동의 화소 쌍 네 개를 조사한다. 그들 중 두 개 이상이 서로 다른 부호를 가진다.
2. 부호가 다른 쌍의 값 차이가 임계값을 넘는다.

3.2.2 LOG 필터

예제 3-2 Marr-Hildreth 에지 검출 알고리즘

[그림 3-14(a)]는 간단한 8×8 영상과 여기에 $\sigma=0.5$ 의 3×3 크기의 LOG 연산자([그림 3-13])를 적용하여 얻은 영상 g 이다. 동그라미로 표시된 (6,3)에 있는 화소의 영교차 여부를 따져보자. 마주보는 네 개의 이웃 쌍 중에 남-북과 북서-남동의 두 개 쌍의 부호가 다르다. 이들을 구성하는 화소의 값 차이는 각각 7.6442와 5.2379이다. 만일 임계값 $T=1.0$ 으로 설정했다면 둘 다 T 를 넘으므로 이 화소는 영교차 점이 된다. [그림 3-14(b)]는 $T=1.0$ 으로 구한 에지 영상 b 이다.

0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	0	0	0	1	0
0	1	2	0	0	0	1	0
0	1	3	1	0	0	2	0
0	1	3	1	0	0	2	0
0	1	2	3	4	4	3	0
0	0	0	0	1	3	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0

0.4038	1.2058	1.2058	0.4038	0	0.4038	0.8021	0.4038
1.2058	-2.4116	-2.0133	1.6096	0	1.2058	-4.0212	1.2058
1.6096	-0.0000	-4.4250	4.0212	0.4038	2.0133	-2.4171	2.0133
1.6096	1.2058	-7.6441	0.4038	1.2058	2.8154	-7.2404	2.8154
1.6096	1.2058	-6.4328	4.4250	7.2404	8.4462	-4.0212	3.6229
1.2058	-1.2058	-3.2246	-7.2404	-11.2616	-9.6574	-7.6441	3.6175
0.4038	1.6096	3.2191	5.6308	3.6175	-6.8311	1.6041	2.0133
0	0	0	0.4038	2.0133	3.2137	2.0133	0.4038

(a) 원래 영상과 LOG 필터를 적용한 영상 g

0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	0	0	0	0	0
0	1	1	1	0	1	0	0
0	1	0	1	0	1	0	0
0	1	1	1	1	1	0	0
0	1	0	0	0	1	1	0
0	0	0	1	1	1	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0

(b) 영교차 검출($T=1.0$)

그림 3-14 LOG 영상과 영교차 영상

3.2.2 LOG 필터

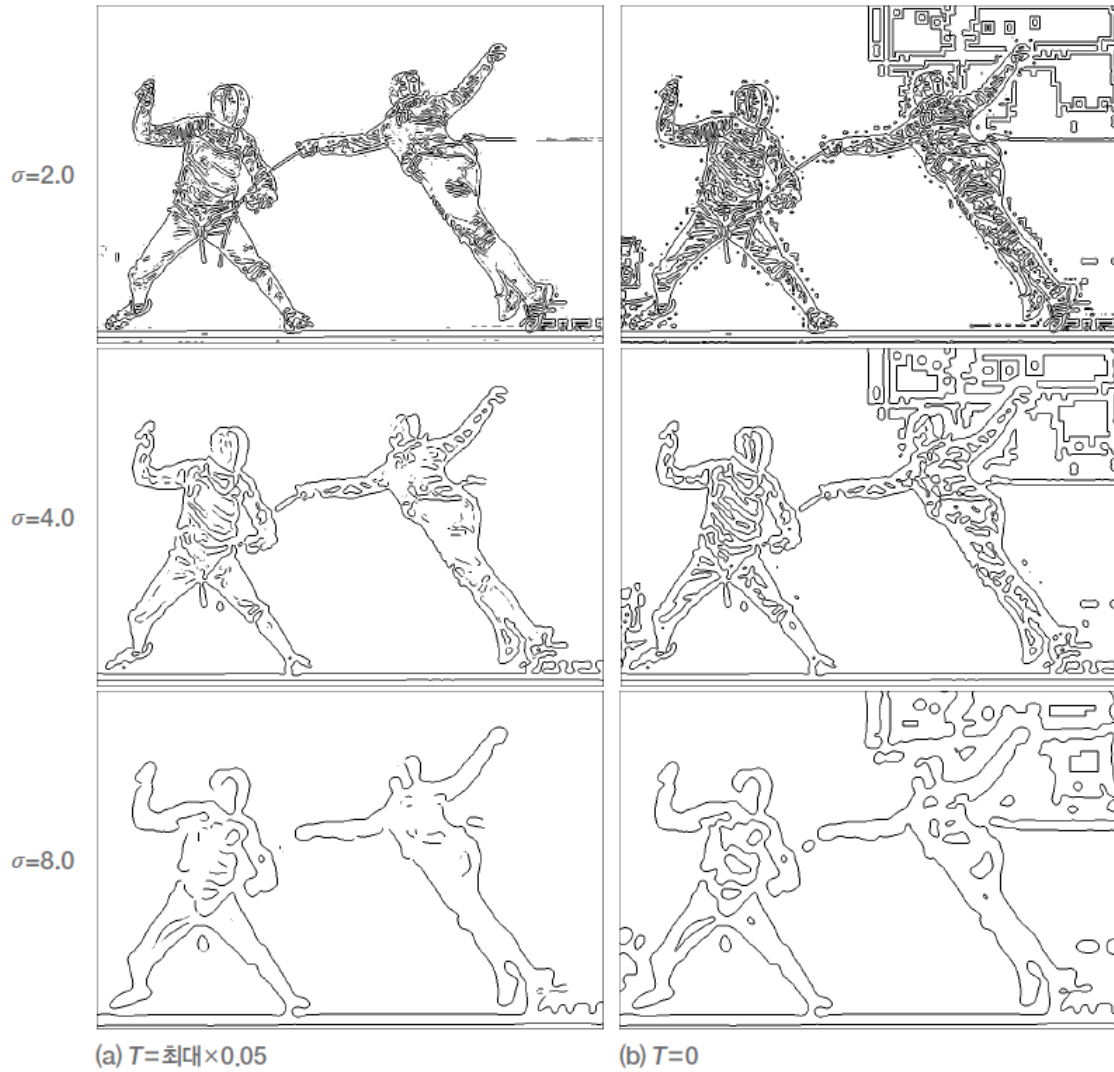


그림 3-15 다중 스케일 에지 검출

The Canny edge detector



original image

The Canny edge detector



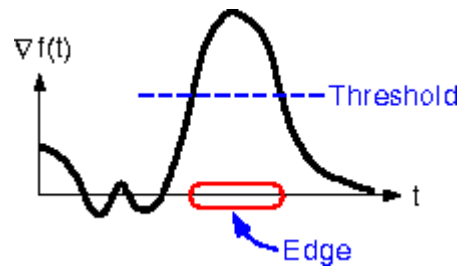
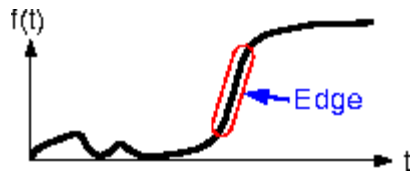
norm of the gradient

The Canny edge detector



thresholding

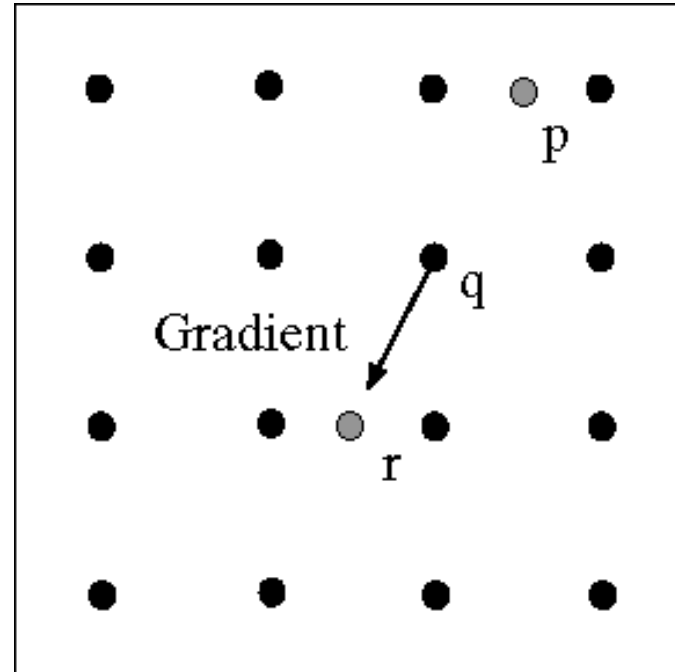
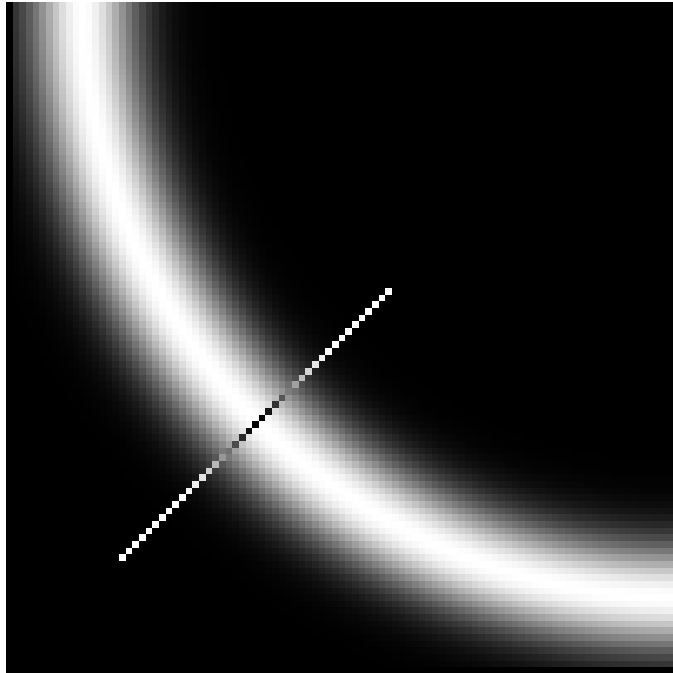
The Canny edge detector



How to turn the se thick regions of the gradient i nto curves?

thresholding

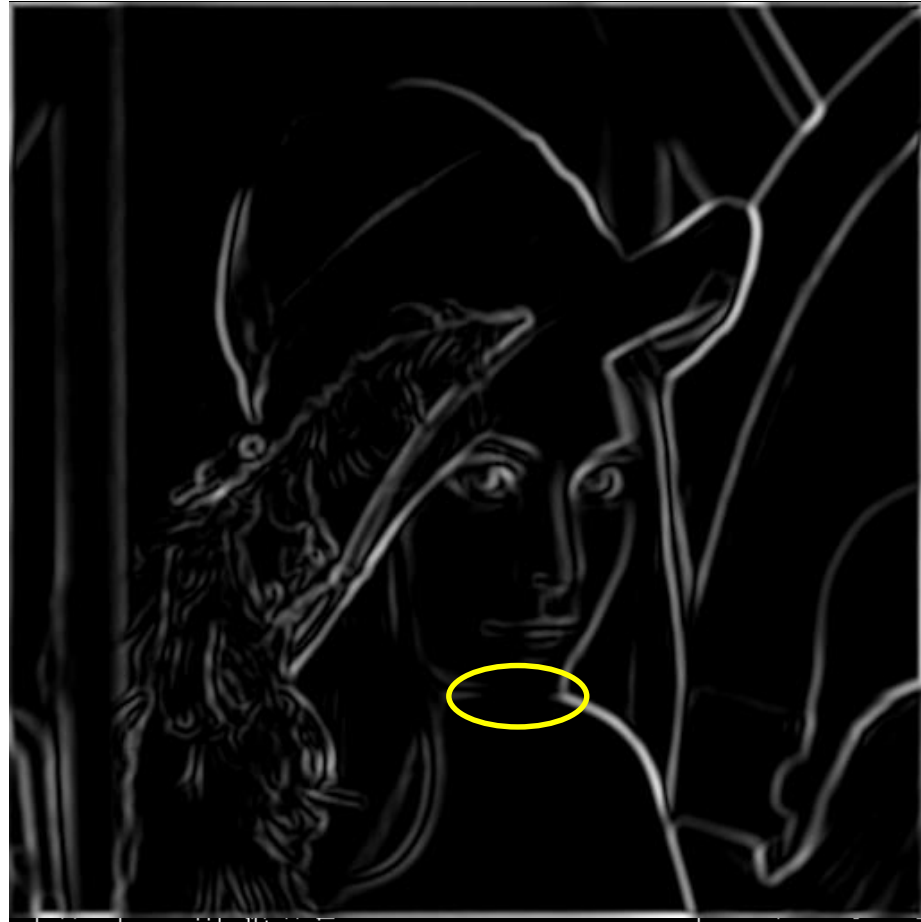
Non-maximum suppression



Check if pixel is local maximum along gradient direction, select single max across width of the edge

- requires checking interpolated pixels p and r

The Canny edge detector

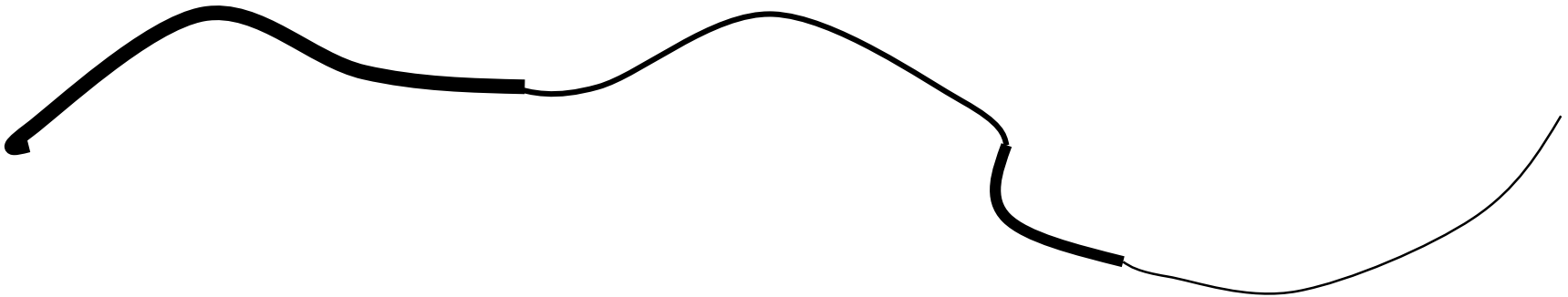


Problem: pixels along this edge didn't survive the thresholding

thinning
(non-maximum suppression)

Hysteresis thresholding

- Use a high threshold to start edge curves, and a low threshold to continue them.



Hysteresis thresholding



original image



**high threshold
(strong edges)**



**low threshold
(weak edges)**



hysteresis threshold

3.3 캐니 에지

- 앞 절은 '그렇듯해 보이는' 에지 연산자 사용

- 1986년에 Canny 에지 발표 [Canny86]

- 에지 검출을 최적화 문제로 해결

- 세 가지 기준

1. 최소 오류율 : 거짓 긍정과 거짓 부정이 최소여야 한다. 즉, 없는 에지가 생성되거나 있는 에지를 못 찾는 경우를 최소로 유지해야 한다.

2. 위치 정확도 : 검출된 에지는 실제 에지의 위치와 가급적 가까워야 한다.

3. 에지 두께 : 실제 에지에 해당하는 곳에는 한 두께의 에지만 생성해야 한다.

[A computational approach to edge detection](#)

[J Canny](#) - Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE ..., 1986 - [ieeexplore.ieee.org](#)

Abstract-This paper describes a computational approach to edge detection. The success of the approach depends on the definition of a comprehensive set of goals for the computation of edge points. These goals must be precise enough to delimit the desired behavior of the ...

19422회 인용 관련 학술자료 전체 17개의 버전 Web of Science: 6073 인용 저장

← Google scholar

3.3 캐니 에지

■ 캐니 에지 검출 알고리즘

알고리즘 3-3 캐니 에지 검출(스케치 버전)

입력 : 영상 $f(j, i)$, $0 \leq j \leq M-1$, $0 \leq i \leq N-1$, 가우시안의 표준편차 σ

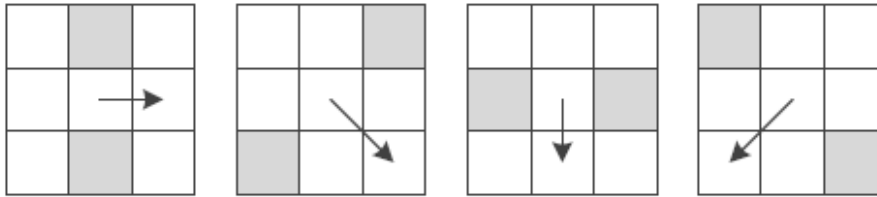
출력 : 에지 영상 $e(j, i)$, $0 \leq j \leq M-1$, $0 \leq i \leq N-1$ // 에지는 1, 비에지는 0인 이진 영상

- 1 입력 영상 f 에 σ 크기의 가우시안 스무딩을 적용한다.
- 2 결과 영상에 소벨 연산자를 적용하여 에지 강도와 에지 방향 맵을 구한다.
- 3 비최대 억제를 적용하여 얇은 두께 에지 맵을 만든다.
- 4 이력 임계값을 적용하여 거짓 긍정을 제거한다.

3.3 캐니 에지

■ 비최대 억제

- 이웃 두 화소보다 에지 강도가 크지 않으면 억제됨



(a) 에지 방향=0 (b) 에지 방향=1 (c) 에지 방향=2 (d) 에지 방향=3

그림 3-17 비최대 억제를 위한 두 이웃 화소(방향 4는 0, 5는 1, 6은 2, 7은 3과 같음)

■ 이력 임계값

- 두 개의 임계값 T_{high} 와 T_{low} 사용하여 거짓 긍정 줄임
- 에지 추적은 T_{high} 를 넘는 화소에서 시작, 추적 도중에는 T_{low} 적용

3.3 캐니 에지

알고리즘 3-4 캐니 에지 검출

입력 : 영상 $f(j,i)$, $0 \leq j \leq M-1$, $0 \leq i \leq N-1$, 가우시안의 표준편차 σ , 이력 임계값 T_{high} 와 T_{low}

출력 : 에지 영상 $e(j,i)$, $0 \leq j \leq M-1$, $0 \leq i \leq N-1$ // 에지는 1, 비에지는 0인 이진 영상

```
1  f에 크기  $\sigma$ 인 가우시안을 적용하여  $g$ 를 얻는다.
2   $g$ 에 소벨 연산자를 적용하여, 에지 강도 맵  $S$ 와 에지 방향 맵  $D$ 를 얻는다. //  $D$ 는 8-방향 양자화
3
4  // 5~9행 : 비최대 억제
5  for( $y=1$  to  $M-2$ )
6    for( $x=1$  to  $N-2$ ) {
7       $(y_1, x_1)$ 과  $(y_2, x_2)$ 를  $(y, x)$ 의 두 이웃 화소라 하자. // [그림 3-17] 참고
8      if( $S(y, x) \leq S(y_1, x_1)$  or  $S(y, x) \leq S(y_2, x_2)$ )  $S(y, x)=0$ ; // 비최대 억제
9    }
10
11 // 12~16행 : 이력 임계값을 이용한 에지 추적
12  $e(y, x)=0$ ,  $0 \leq y \leq M-1$ ,  $0 \leq x \leq N-1$ ;
13  $visited(y, x)=0$ ,  $0 \leq y \leq M-1$ ,  $0 \leq x \leq N-1$ ; // 모든 화소가 아직 방문 안됨을 표시
14 for( $y=1$  to  $M-2$ )
15   for( $x=1$  to  $N-2$ )
```

3.3 캐니 에지

```
17  
18 // 에지를 추적하는 재귀 함수(배열은 모두 전역변수라 가정)  
19 function follow_edge(y,x) {  
20     visited(y,x)=1; // 방문했음을 표시  
21     e(y,x)=1; // 에지로 판정  
22     for((y,x)의 8 이웃 (ny, nx) 각각에 대해)  
23         if( $S(ny, nx) > T_{low}$  and  $visited(y, x) = 0$ ) follow_edge(ny, nx);  
24 }
```

3.3 캐니 에지



(a) 원래 영상(342×800)

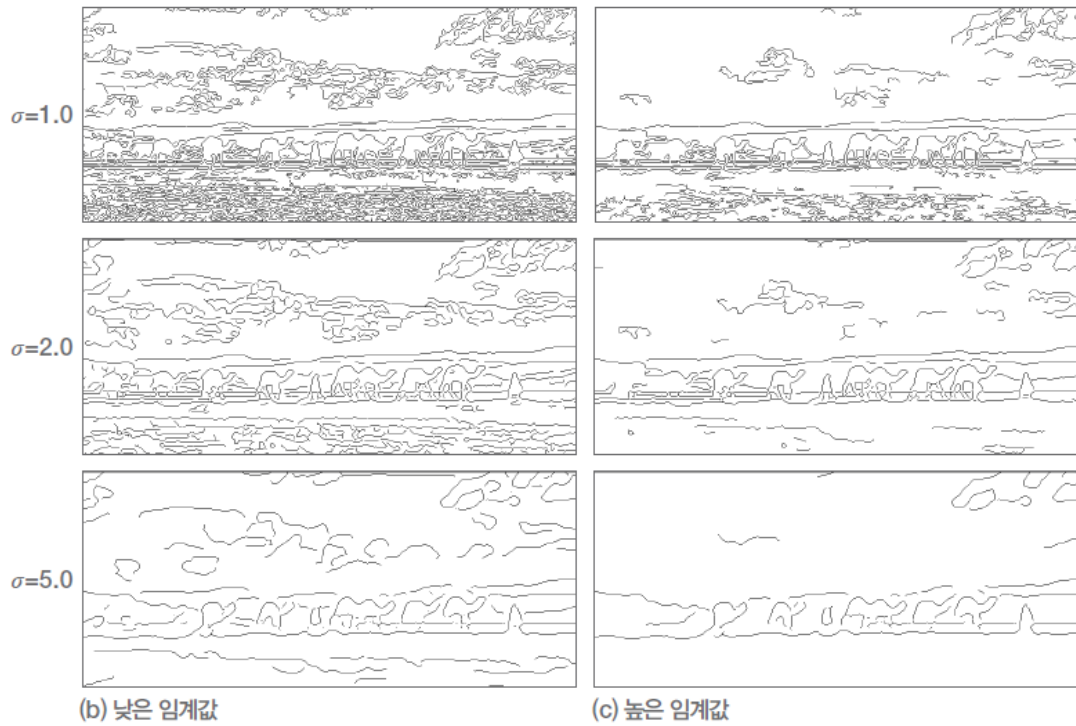


그림 3-18 캐니 에지

3.4 컬러 에지

- RGB 채널에 독립적으로 적용 후 OR 결합
 - 에지 불일치 발생

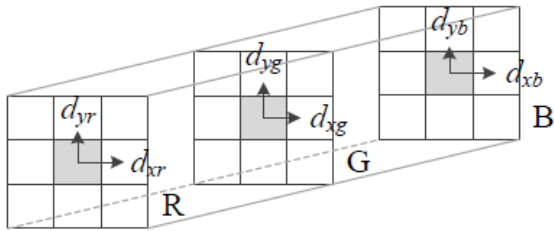


그림 3-19 RGB 컬러 공간에서 그레이디언트



그림 3-20 RGB 영상에서 OR 연산으로 구한 에지

3.4 컬러 에지

■ 디 젠조 방법

$$\begin{aligned}g_{yy} &= (d_{yr})^2 + (d_{yg})^2 + (d_{yb})^2 \\g_{xx} &= (d_{xr})^2 + (d_{xg})^2 + (d_{xb})^2 \\g_{yx} &= d_{yr}d_{xr} + d_{yg}d_{xg} + d_{yb}d_{xb}\end{aligned}\tag{3.13}$$

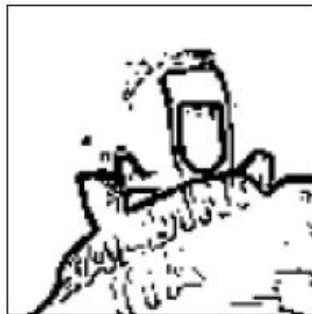
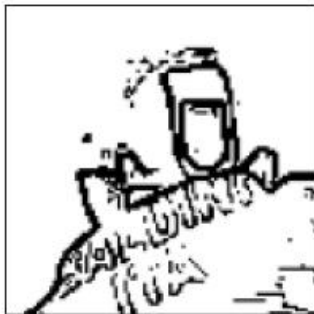
$$\text{그레이디언트 방향 : } D(y,x) = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2g_{yx}}{g_{xx} - g_{yy}}\right)\tag{3.14}$$

$$\text{에지 강도 : } S(y,x) = \sqrt{0.5 \times ((g_{yy} + g_{xx}) + (g_{xx} - g_{yy}) \cos(2D(y,x)) + 2g_{yx} \sin(2D(y,x)))}\tag{3.15}$$

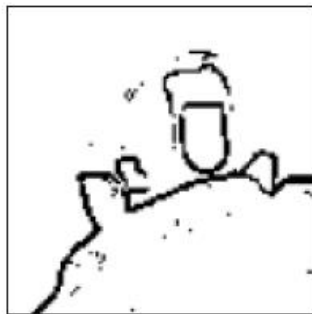
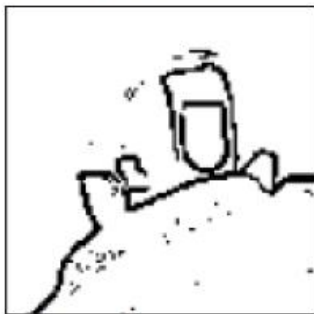
3.4 컬러 에지



(a) 에지 맵



(b) $T=0.2$ 로 이진화



(c) $T=0.3$ 으로 이진화

그림 3-21 디 젠조 에지 맵(왼쪽)과 RGB채널을 평균한 에지 맵(오른쪽)