

工學碩士 學位論文

인간의 시지각에 근거한 밝기 불균일 결함의 검출에 대한 연구



이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함

2004年 2月

釜慶大學校 大學院

寫眞情報工學科

金 熙 榮

金熙榮의 工學碩士學位論文을 認准함

2003年 12月

主 審 工學博士 吳 正 秀



委 員 理學博士 金 鍾 太



委 員 工學博士 金 志 泓



목 차

목차	i
도목차	iii
표목차	iv
Abstract	v
I. 서 론	1
II. 불균일한 밝기에 대한 시인성	2
1. 인간의 시각특성 : 대수적 특성	2
2. 관능실험	3
2.1 불균일한 밝기의 공간적 분포	4
2.2 관능실험	8
2.3 실험결과	8
III. 밝기 불균일 결함을 검출하는 알고리즘	10
1. 밝기변화율을 구하는 방법	10
2. 화상처리	11
2.1 고역통과 필터	11
2.2 기하학적 필터	12
2.2.1. 이진 기하학적 필터	12
2.2.2. 명암 기하학적 필터	14
2.3 이진화	14
3. Contour를 이용한 밝기 불균일 결함의 검출	16
3.1 밝기변화에 대한 정보를 구하는 화소의 선정	17
3.2 밝기변화율의 크기와 방향	18

3. 검출알고리즘을 적용한 결과	20
IV. 검출알고리즘의 성능평가	27
1. 관능실험	27
2. 상관관계를 분석하는 방법	30
2.1 피어슨 상관계수	31
2.2 회귀분석	33
3. 실험결과	35
V. 결론	39
VI. 참고 문헌	40

표목차

표 1. 결함에서의 밝기 변화율에 대한 등급 평가치	37
------------------------------------	----

그림목차

그림 1. 눈의 대수적 명암도 반응	3
그림 2. 화소값의 공간적 분포	5
그림 3. 다양한 밝기편차(ΔL)와 밝기변화율(γ)에 따라 만든 화상	7
그림 4. 밝기편차(ΔL)와 밝기변화율(γ)에 대한 시인성	9
그림 5. Contour의 예	11
그림 6. 고역통과 필터의 마스크 구성	12
그림 7. 밝기 불균일 결함을 검출하는 알고리즘	16
그림 8. 밝기변화에 대한 정보를 구할 화소의 선정	18
그림 9. Contour 사이의 거리	19
그림 10. 전체 밝기변화율	19
그림 11. 비전 시스템	20
그림 12. LCD를 실제로 촬상한 화상	22
그림 13. 굴곡이 심한 Contour	23
그림 14. 완만한 contour	23
그림 15. 가로와 세로방향에 대해서 선정된 화소	24
그림 16. 최종적으로 선정된 화소	24
그림 17. 결함을 표시한 화상	26
그림 18. 결함영역을 표시한 화상	29
그림 19. 여러 가지 산포도	30
그림 20. 상관관계의 강도	31
그림 21. 오차항	35
그림 22. 결함에서의 밝기변화율에 대한 등급 평가치	38

A Study on Human vision based Detection of Non-uniformity Defects

Hee Young, Kim

Department of Photographic Science and Information Technology,

Graduate School,

Pukyong National University

Abstract

An algorithm for detecting the defects due to spatially non-uniform brightness in LCD devices is proposed. The detection method is based on human vision, and via proper subjective experiments for visibility of non-uniform brightness, we found that visibility of defects depends mainly on the spatial gradient of brightness variation. So, we propose the algorithm to detect the defects, where the spatial gradient values acquired from extracted contour will be utilized to detect the defect due to non-uniform brightness. The algorithm is composed of four parts, those are, contour extraction, the calculation of spatial gradient, judgments and the display of defects. We applied the algorithm to the images of practical LCD panels, and the result seems satisfied consistency to the detection by human vision. or to color films which contain dye layers in Weather-O-Meter test, there were hardly much difference in print papers.

I. 서론

디스플레이 장치에서 만족스러운 화질의 화상을 보기 위해서는 디스플레이 장치의 밝기가 균일해야 하는 것이 필수적이다. LCD와 같은 디스플레이 장치는 제조 공정이나 백라이트의 휘도의 불균일성으로 인해서 불균일한 밝기가 존재할 수 있으며[1, 2], 불균일한 밝기가 인간에게 관찰될 때에는 불균일한 밝기의 차이나 공간적 분포 등에 따라 다양한 형태의 얼룩으로 보인다. 이와 같은 얼룩은 시각적으로 불쾌감을 주는 결함으로서 제거되어야 한다. 지금까지, 숙련된 검사원이 시각적인 비교검사를 통해서 결함 여부를 판단하는 방법이 이용되었다. 그러나, 이 방법은 단시간에 검사를 하려고 할 경우에 많은 일손이 필요하고, 검사원의 개인차나 피로 등에 의해 검사기준의 변동이나 있게 된다. 그러므로, 일정한 검사기준을 가지고 결함을 자동으로 검사하는 방법의 개발되어야 한다. 그런데, 결함 여부는 인간의 눈에 어떻게 보이느냐로 최종적으로 결정되므로[3], 디스플레이 장치의 불균일한 밝기에 의한 결함을 검출하는 방법은 인간의 시각특성을 근거로 개발될 필요가 있다.

본 논문에서는 디스플레이 장치의 불균일한 밝기가 시각적으로 얼룩과 같은 결함으로 보이는 경우에 이를 검출하는 알고리즘을 제안한다. 시각적으로 불균일한 밝기를 검출하는 알고리즘을 제안하기에 앞서, 인간의 눈에 불균일한 밝기가 어떻게 보이는가에 대한 시지각 특성[4,5,6]을 조사할 필요가 있으며, 이를 위해 밝기의 불균일성을 나타내는 파라메타 중에서 대표적으로 밝기편차와 밝기변화율을 정의하고, 이들 두 파라메타와 시인성의 상관관계를 알아보는 관능실험을 수행하였다. 또한, 관능실험의 결과를 근거로 디스플레이 장치를 촬상한 화상에서 밝기 불균일에 의한 결함을 자동으로 검출하는 알고리즘을 제안하였으며, 이 알고리즘에 의해 검출된 결함에서의 밝기변화율의 크기에 따라 인간의 눈에 불균일한 밝기가 얼마나 잘 시인되는가를 알아보는 관능실험을 수행하였다.

II. 불균일한 밝기에 대한 시인성

1. 인간의 시각특성 : 대수적 특성

이 절에서는 잘 알려진 밝기에 대한 인간의 시각특성 중 자극에 대한 반응이 대수적 특성을 보이는 것에 대해 알아본다.

눈의 시각적 자극이 시각 피질에 의해 처리되기 전에, 밝기 정보의 흥미있는 전처리가 눈에서 자체적으로 일어나는데, 눈에 들어오는 빛의 명암도와 그 인지된 밝기의 관계는 선형함수가 아니다. 이것은 관찰된 특징의 명암도가 바뀌어도 관찰자는 밝기가 똑같이 변화한다고 인지하지는 않는다는 것을 의미한다. 눈의 실제 명암도 반응은 그림 1과 같은 곡선으로 대수적인 형태이다. 그림 1에서는 인간의 눈이 명암도 변화를 검출할 수 있기 위해서 그 전의 명암도 변화의 거의 두 배여야 한다는 것을 보여준다. 그래서, 한 장면의 어두운 영역에서의 밝기의 작은 변화가 밝은 영역에서의 동일한 작은 변화보다 잘 인식되는 경향이 있다. 이 같이 인지된 휘도와 명암도의 관계를 Weber의 법칙이라 한다.[1]

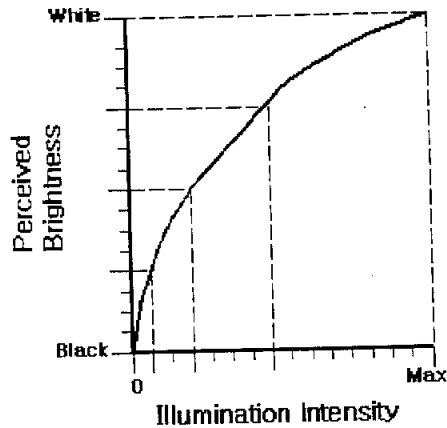


그림 1. 눈의 대수적 명암도 반응

2. 관능실험

밝기 불균일 결함의 검출에 인간의 시지각 특성을 적용하기 위하여, 우선, 불균일한 밝기가 인간에게 어떻게 관찰되는가에 대한 시지각 특성을 조사하는 관능실험을 수행할 필요가 있다. 이를 위해, 우선, 밝기의 불균일성을 나타내는 파라메타를 정의하고, 이 파라메타에 따라 공간적으로 다양하게 분포하는 불균일한 밝기가 어떻게 관찰되는가를 알아보았다. 관능실험은 불균일한 밝기가 공간적으로 다양하게 분포된 화상을 보여주고, 불균일한 밝기에 의한 결함이 인간에게 관찰되는가를 설문조사하여 분석하는 방법을 이용하여 수행되었고, 이 결과는 다음 장에 제안된 밝기 불균일 결함의 검출알고리즘에 이용된다.

2.1 불균일한 밝기의 공간적 분포

밝기 불균일성을 나타내는 파라메타로는 여러 가지를 설정할 수 있는데, 그 중에서 밝기편차는 쉽게 정의될 수 있는 대표적인 파라메타 중 하나이다. 밝기편차는 주변과의 밝기의 차이로 정의할 수 있으며, 일반적으로 밝기편차가 클수록 밝기가 시각적으로 불균일하게 보인다. 그런데, 밝기편차가 크지 않고 밝기가 공간적으로 급격하게 변화하는 경우에도 불균일한 밝기가 시각적으로 관찰된다. 여기서, 밝기의 공간적인 변화율을 밝기변화율로 정의하고 밝기 불균일성을 나타내는 대표적인 파라메타로 사용하였다.

앞에서 정의된 두 파라메타인 밝기편차와 밝기변화율에 따라 불균일한 밝기의 시인성이 어떻게 변화하는가를 조사하기 위해 256 계조의 그레이화상을 이용하여 관능실험을 수행하였는데, 이 화상들은 다른 값의 밝기편차와 밝기변화율에 의해 만들어졌으며 밝기의 공간적 분포에 따라 시각적으로 다양하게 관찰된다. 이 때, 화상에서는 밝기를 화소값으로 근사적으로 나타낼 수 있으므로 밝기편차를 주변화소와의 화소값 차이로, 밝기변화율을 화소값의 공간적인 변화율로 나타낼 수 있다.

화소값이 공간적으로 다양하게 분포된 화상들 중에서 불균일한 밝기를 나타내는 대표적인 것으로 화상의 중심에서 같은 거리에 있는 화소가 동일한 화소값을 가지는 형태를 선정하였으며, 이 같은 화상에서 밝기는 시각적으로 동심원의 모양으로 변한다. 이와 같은 화소값의 공간적 분포는 밝기편차와 밝기 변화율의 정의가 간단하고 화소값이 공간적으로 완만하게 분포되게 하는 2 차원 정규분포함수[7,8]를 이용하여 만들 수 있으며, 2 차원 정규분포함수를 이용한 화소값의 분포함수를 수식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f(x, y) = L + \frac{\Delta L}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - m_x)^2 + (y - m_y)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

여기서, f 는 화소값, L 은 주변화소값, ΔL 은 밝기편차, x 와 y 는 각각 화상의 가로, 세로의 길이, m_x 와 m_y 는 밝기변화가 시작되는 중심점의 가로, 세로의 위치, σ 는 표준편차를 나타낸다. 수식 (1)과 같은 화소값의 공간적 분포를 한 방향에 대해서만 고려하여 도시하면 그림 2와 같다. 그림 2에서 화소값은 주변화소값 L 과 중심화소값 $L + \Delta L$ 사이에서 완만하게 변하며, 여기서 ΔL 은 밝기편차를 나타낸다. 또한, 정규분포함수의 기울기는 $x = m_x \pm \sigma$ 일 때 최대가 되며, 이 때의 기울기를 밝기변화율 γ 로 정의한다. γ 는 수식 (2)에 나타냈듯이 ΔL 에 비례하고 σ 에 반비례하므로 밝기변화율은 ΔL 이 일정한 경우 표준편차 σ 에 의해 결정된다.

$$\gamma = \frac{\Delta L}{\sigma^2} \quad (2)$$

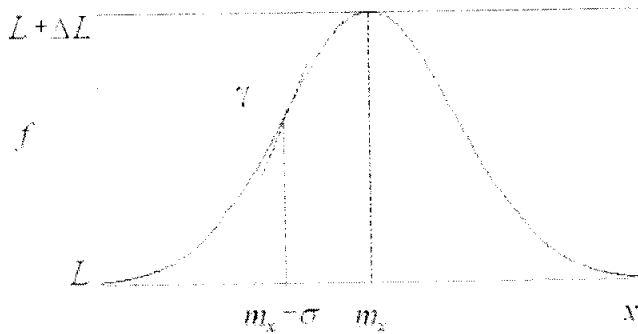
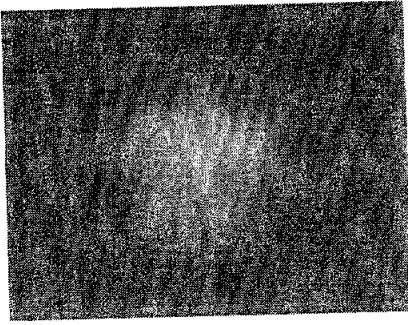


그림 2. 화소값의 공간적 분포

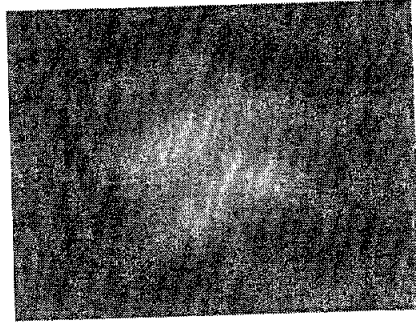
앞에서 기술한 형태로 불균일한 밝기가 분포된 화상을 제작하여 실험에 이용하였으며, 이 때 주변화소값 L 을 최대화소값의 50 %인 128로 하

고, ΔL 과 γ 의 값을 변화시키면서 다양한 실험용 화상을 제작하였다. 이와 같이 ΔL 과 γ 의 값을 다양하게 하여 만든 화상의 예를 그림 3에 보여 주었다.

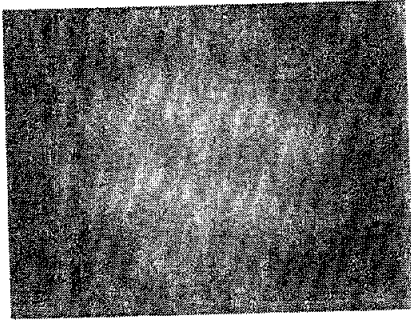
다음 절에서는 이 화상들을 이용하여, 불균일한 밝기가 인간에게 어떻게 관찰되는가에 대한 인간의 시각특성을 조사하는 관능실험을 수행한다.



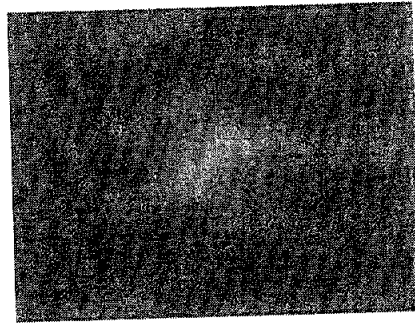
(a) $\Delta L=30$, $\gamma=0.003$



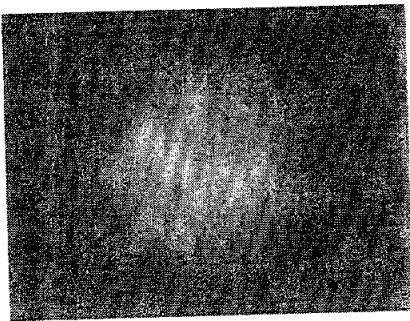
(b) $\Delta L=30$, $\gamma=0.0021$



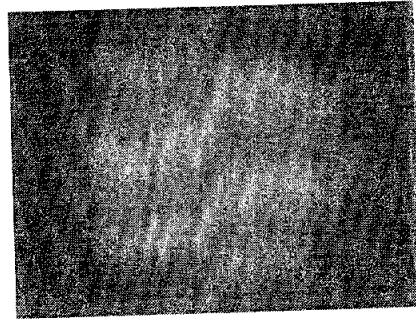
(c) $\Delta L=30$, $\gamma=0.0009$



(d) $\Delta L=15$, $\gamma=0.001$



(e) $\Delta L=40$, $\gamma=0.0028$



(f) $\Delta L=40$, $\gamma=0.001$

그림 3. 다양한 밝기편차(ΔL)와 밝기변화율(γ)에 따라 만든 화상

2.2 관능실험

관능실험은 불균일한 밝기가 시각적으로 관찰되는가를 설문조사하는 방법으로 수행되었으며, 8명의 참가자를 대상으로, 앞 절에서 ΔL 을 20단계, γ 를 15단계로 변화시키면서 제작한 300개의 화상을 이용하였다. 또한, 화상들은 70lux 조도의 실험실에서 밝기 불균일 결함이 없는 해상도 1024*768의 15.1 인치의 LCD 상에 표시되었으며, LCD 주변의 배경색을 Neutral Gray로 하였다. 그리고, 실험방법은 300개의 화상을 무순으로 LCD 상에 표시하여 실험참가자에게 보여주고, '밝기 불균일에 의한 얼룩이나 밝기가 변하는 경계부가 인식되는가'라고 질문을 하는 것으로 구성되어 있다. 이 때, 밝기편차와 밝기변화율이 다른 화상별로, 전체 실험참가자에 대한 위에서 언급한 질문에 '예'라고 답한 참가자의 수의 비율을 백분율로 나타낸 것을 시인성으로 하였다.

2.3 실험결과

앞 절에서 설명한 실험방법으로 수행된 관능실험의 결과를 그림 4에 그래프로 도시하였으며, 그림 4에서 x 축과 y 축은 각각 밝기편차와 밝기변화율을 나타내고, z 축은 시인성을 나타낸다. 그림 4을 살펴보면, 밝기변화율이 일정하고 밝기편차가 증가하면 시인성의 변화가 적었으나, 밝기편차가 일정하고 밝기변화율이 증가하면 시인성이 급격하게 변화하였다. 이것으로부터 불균일한 밝기가 시각적으로 눈에 얼마나 잘 띄는가는 밝기의 공간적 변화율에 크게 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다. 그러므로, 디스플레이 장치의 밝기 불균일에 의한 결함을 검출하는 중요한 요인으로 밝기변화율을 적용시킬 수 있으며, 다음 장에서는 위의 실험결과를 근거로 화상에서 밝기변화율을 구하고, 밝기변화율의 크기가 큰 부분을 밝기 불균일 결함으로 검출하는 알고리즘을 제안한다.

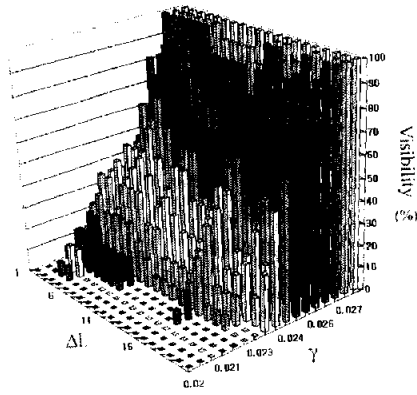


Figure 4. 밝기편차(ΔL)와 밝기변화율(γ)에 대한 시인성

III. 밝기 불균일 결함을 검출하는 알고리즘

1. 밝기변화율을 구하는 방법

밝기의 공간적 변화율에 대한 정보를 얻는 방법으로는 일반적으로 공간주파수 성분을 추출하는 푸리에변환[9,10]이나 주위 화소의 화소값과의 비교를 통해 밝기의 공간적 변화율을 추출하는 공간필터처리[9]를 이용하는 방법 등이 있다. 그런데, 결함을 검출할 대상인 불균일한 밝기는 공간적으로 천천히 변화하므로 낮은 공간주파수 성분을 가지고 있다. 그렇기 때문에 푸리에변환은 저주파성분의 변화율을 추출하기 어렵고, 공간필터처리는 큰 마스크를 사용할수록 계산량이 너무 많아진다는 문제점이 있다. 여기서는 이 같은 문제점을 개선하기 위해 밝기의 공간적 변화율을 구하는 새로운 방법인 Contour를 이용하는 방법을 제안하였다.

일반적으로, Contour는 값이 같은 점들을 연결한 선으로 정의되며, 여기서는 동일한 화소값을 갖는 영역 사이의 경계선을 Contour로 정의하였다. Contour는 Highpass filter로 추출할 수 있으며, Contour 사이의 거리나 Contour의 형태 등에 따라 밝기변화율의 크기, 밝기가 공간적으로 변하는 방향과 같은 밝기변화에 대한 정보를 알 수 있다. 2장에서 제작한 화상들 중, 그림 3의 (a)에서 Contour를 추출한 예를 화상으로 그림 5에 보여주었다. 다음 절에서는 화상에서 Contour를 추출하여 밝기변화율을 구한 다음, 이 밝기변화율을 이용하여 결함을 검출하는 방법을 제안하였다.

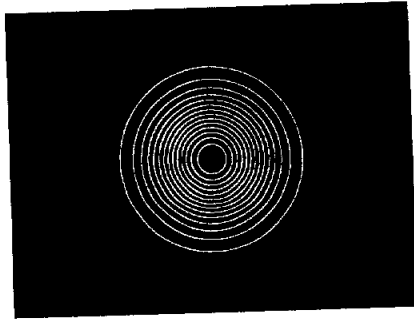


그림 5. 추출된 Contour의 예

2. 화상처리

이 절에서는, 밝기 불균일 결함을 검출하는 알고리즘 중, Contour를 추출하는데 이용되는 화상처리 기법인 고역통과 필터링, 기하학적 필터, 이진화에 대해 살펴본다.

2.1 고역통과 필터(Highapss filter)

고역통과 필터는 마스크를 이용하여 컨볼루션 연산을 한다. 그러므로, 우선 컨볼루션 연산에 대해 살펴보면, 입력된 영상에 대해 출력 영상은 수식 (3)과 같이 계산될 수 있다.

$$A'(x, y) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} A(i, j)K(x-i)(y-j) \quad (3)$$

여기서, A는 입력 화상, k는 컨볼루션 마스크, A'는 출력 화상이다. 컨볼루션 연산은 한 입력 화소를 중심으로 마스크를 씌우고, 마스크를 구성하는 값과 화소 대 화소로 곱한다. 그리고 그 결과들을 서로 더해서 총화소의 수로 나누고, 이 값을 출력 화상의 화소값으로 한다.

이와 같은 컨볼루션 연산을 통해 고역통과 필터링을 하기 위한 마스크의 구성은 다음의 그림 6과 같다.

-1	-1	-1
-1	8	-1
-1	-1	-1

그림 6. 고역통과 필터의 마스크 구성

2. 2 기하학적 필터(Morphological filter)

2.2.1 이진 기하학적 필터

이진 화상의 기하학적 처리는 공간적 컨볼루션 연산과 유사하다. 공간적 컨볼루션은 어떤 화소에 대하여 주변 화소들의 공간 주파수 특성을 기초하여 화소의 새로운 밝기값을 계산하는 것이다. 반면에, 기하학적 처리는 이론적으로 어떤 특성의 패턴을 찾기 위하여 어떤 기하학적 요소와 화소의 밝기값을 결합하는 것이다.

가장 기본적인 기하학적 연산들은 침식(erosion)과 팽창(dilation)이다. 침식 처리는 물체의 크기를 그 배경과 관련하여 일정하게 줄여주는 것이고, 팽창 처리는 침식 처리의 반대 과정으로서 물체의 크기를 일정하게 확장하는 것이다. 침식과 팽창 처리는 화상에서 작은 물체 특징들을 제거하는데 사용된다. 예를 들어 잡음 성분이나 불완전한 에지 등을 제거한다. 이들은 많은 추가적인 처리를 위한 기초를 제공한다.

먼저, 이진 화상에서 물체는 백색, 즉, 1을 가지고, 배경은 흑색, 즉, 0을 가진다고 정의하면 일반화된 3*3 침식 마스크의 구성요소는 모두 1이

다. 기하학적 처리 과정은 개개의 화소 밝기를 해당되는 마스크 값과 비교한다. 침식 처리에서는 9개의 모든 화소들이 그들의 마스크 값들과 일치되면 그 출력 화소값은 1로 결정되고, 만약 적어도 하나의 화소라도 그 마스크 값과 일치하지 않으면, 그 출력 화소값은 0으로 결정된다.

어떤 이진 화상에서 침식 처리를 수행하는 경우, 백색의 물체는 그 크기가 줄어들게 된다. 크기가 한 화소에 지나지 않는 매우 작은 특징들의 경우에는 소멸되고 만다. 만약 이러한 침식 처리를 계속해서 수행을 하면, 백색물체는 점차 축소되고 끝내는 전체가 소멸되고 말 것이다. 이러한 침식 처리는 서로 맞닿아 있는 두 개의 물체를 분리하는데 응용될 수 있다. 이것은 각 물체가 점차 축소되면서 결국에는 개개의 물체들로 분리될 수 있기 때문이다.

팽창 처리는 침식 처리의 반대의 경우로서, 일반화된 팽창 마스크의 구성요소는 모두 0이다. 이 마스크는 백색 물체의 주변에 단일 화소를 추가하는 역할을 한다. 침식 처리와 달리, 9개의 모든 화소들이 그들의 마스크 값들과 일치되면 그 출력 화소값은 0으로 결정되고, 만약 적어도 하나의 화소라도 그 마스크 값과 일치하지 않으면, 그 출력 화소값은 1로 결정된다.

팽창 처리를 이진 화상에 수행하면, 백색 물체의 크기는 성장하게 된다. 매우 작은 특징들도 점차 확장되어 그 형상이 강조된다. 이러한 팽창 처리를 계속하여 적용시키면 백색 물체는 확장을 계속하고 결국에는 모든 화소값이 백색으로 될 것이다. 이러한 처리는 영상 내에 난잡한 파편 조각들로 인하여 물체가 분리되어진 경우에 이들을 결합하는데 유용하게 사용될 수 있다.

지금까지 설명한 침식과 팽창 처리는 기본적인 형태학적 처리 과정이며, 개방(opening)과 폐쇄(closing)는 이차적인 동작으로 침식과 팽창 처리를 사용하여 구현된다.

개방 처리는 단순히 팽창 처리를 한 다음에 침식 처리를 하는 것이다.

개방 처리의 효과는 침식과 같이 작은 돌출부나 잡음들과 같은 단일 화소 물체의 변형들을 제거하는 것이다. 결과적으로 물체의 외곽선은 평활화된다. 침식 과정과 달리, 개방 처리는 원래의 물체 형상과 그 크기를 유지하는 경향이 있다. 이것은 침식 처리가 물체를 한 화소 정도만큼 축소시키지만, 팽창 처리에 의해 다시 원래의 크기로 복원시키기 때문이다.

폐쇄 처리는 개방 처리와 반대로 팽창 처리를 수행한 후에 침식 처리를 수행하는 것이다. 폐쇄 처리는 단일 화소 단위 이상의 물체들을 채우게 되며 유사한 작은 구멍들이나 틈새를 채우게 된다. 개방 처리와 같이, 폐쇄 처리도 물체의 외곽선이 평활화되며, 물체의 형상이나 크기를 유지시킨다.

2.2.2 명암 기하학적 필터

이진 처리와 같이, 그레이 화상에서 침식과 팽창 처리는 명암 기하학적 처리에서 가장 중요한 두 가지 처리 과정이다. 침식 처리는 배경에 대한 물체의 크기를 축소시키고, 팽창은 그 반대 작용을 한다.

침식 처리에서 마스크의 구성요소는 모두 0이다. 이것은 명암 침식 방정식이 입력화소와 그 근방값들에 0을 더한다는 것이다. 그리고 9개의 값들 중 최소값이 출력값이 된다. 그래서 기본적인 침식 처리는 입력 화소와 그 근방값들 중에서 최소값이 그 출력값이 되도록 하는 것이다.

팽창 마스크 역시 모든 구성요소가 0이며, 이것은 명암 팽창 방정식이 입력 화소와 그 근방값에 0을 더한다는 것을 말한다. 그리고 이들 9개의 값들 중 화소값이 최대인 값이 출력값이 되도록 한다.

2.3 이진화(Thresholding)

이진화는 디지털 화상처리에서 중요한 부분을 차지하고 있다. 특히,

실용적인 화상처리 시스템은 이진 화상처리를 중심으로 구성되어 있다. 실용적인 시스템에서는 처리의 고속성, 저비용이 요구되므로 처리해야 할 정보량이 많은 2bit 이상의 영상은 명암 영상 처리에 적합하지 않다.

이진 화상 데이터는 그레이의 영상을 경계값을 이용하여 흑과 백의 두 가지 색만을 가지도록 변경한 데이터를 취급하는 데이터라고 이야기 할 수 있다. 그러므로, 이진 화상 데이터는 처리에 있어서 단순하여 실용적인 시스템에 널리 이용되었다. 이러한 이진 화상 데이터의 이해를 돕기 위해 그레이 화상의 경계값을 처리하는 과정을 중심으로 설명하였다.

경계값 처리하는 것은 입력 화상의 각 화소의 명도를 기준이 되는 값을 중심으로 해서 기준값보다 크면 1, 그 외는 0으로 변경하는 것이다. 화상의 특징을 해석하기 위해서는 화상에서 대상물을 추출하여 대상과 배경을 분리한 이진 화상으로 취급하는 경우가 많다. $f(m, n)$ 을 이진 화상 $B(m, n)(B \in \{0, 1\})$ 로 변환하는 조작을 화상의 이진화라고 한다. 이것은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} B \in \{m, n\} &\approx X \in A \text{인 경우} \\ X &\notin A \text{인 경우} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, X 는 화소 (m, n) 이 가진 특성 또는 성질을 나타낸 것으로 속성값(Attribute)이라고 한다. 속성값으로는 명도, 색상 등을 들 수 있다. A 는 속성값 집합의 부분 집합이다.

화상의 속성값을 명도값 f 로 하는 경우, 임계값 T 를 이용하여 이진화를 한다면 다음의 수식에 의하여 이진화가 정해진다.

$$\begin{aligned} B \in \{m, n\} &\approx f(m, n) \leq T \text{인 경우} \\ f(m, n) &> T \text{인 경우} \end{aligned} \quad (5)$$

일반적으로, $B(m, n)=1$ 인 화소 집합을 대상물 영역, $B(m, n)=0$ 인 화소의 집합을 배경 영역이라고 한다.

3. Contour를 이용한 밝기 불균일 결함의 검출

이 절에서는 Contour를 추출하여 밝기변화에 대한 정보를 구하여 결함을 검출하는 방법을 그림 7과 같이 제안한다. 밝기 불균일 결함을 검출하는 방법은, 우선, 화상에서 Contour를 추출하고, 이 Contour를 이용하여 밝기변화에 대한 정보를 구한다. 그런데, 밝기변화에 대한 정보는 모든 화소마다 구해질 수 있으나, 밝기 불균일 결함을 검출할 화상에서 모든 화소마다 밝기변화에 대한 정보를 구할 필요는 없을 것이다. 그러므로, 불균일한 화소값의 공간적 분포에 따라 적절한 화소를 선정하고, 그 화소에서 밝기변화에 대한 정보를 구하였다. 즉, 화소값의 변화가 거의 없는 부분에서는 적은 수의 화소를 선정하고 화소값이 급격히 변화하는 부분에서는 화소를 조밀하게 선정한 후, 선정된 화소에서의 밝기변화율의 크기와 방향을 구하였다. 그리고, 구한 밝기변화율이 정해진 값보다 큰 경우 이를 결함으로 판정하고, 그 때의 화소 주위에 밝기변화에 대한 정보를 적절히 표시함으로써 결함 검출알고리즘이 수행되었다.

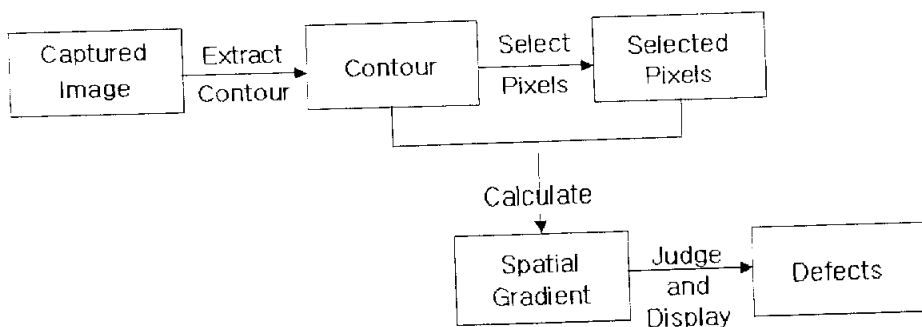


그림 7. 밝기 불균일 결함을 검출하는 알고리즘

밝기 불균일 결함을 검출하는 알고리즘은 위에서 간단히 언급되었듯이 4개의 방법으로 구성되어 있는데, 이 방법들 중에서 Contour를 이용하여 밝기변화에 대한 정보를 구하는 화소를 선정하는 방법과 선정된 화소에서 밝기변화율의 크기와 방향을 구하는 방법을 구체적으로 설명한다.

3.1 밝기변화에 대한 정보를 구하는 화소의 선정

밝기변화에 대한 정보를 구하는 화소는 Contour가 공간적으로 얼마나 조밀하게 분포되었는가에 따라 선정하며, 여기서는 2차원 Contour 분포를 이용한 화소 선정의 간단한 방법으로, 가로와 세로방향으로 나누어서 화소를 각각 선택한 후, 가로와 세로방향에 대한 화소를 조합하여 밝기변화에 대한 정보를 구할 필요가 없는 화소의 제거하면서 새로운 화소를 최종적으로 선정하는 방법(그림 8)을 제안한다.

구체적으로, 가로방향에 대해서 화소를 선정하는 방법은, 우선, 복수개의 가상의 수평선을 등간격으로 그리고, 수평선의 중심에서 좌우 양측으로 수평선과 Contour가 만나는 화소들을 선택한다. 이 같이 선정된 화소들은 Contour 위에 있으므로, Contour 간격을 구하기 위해 이 화소들 사이의 중심점에 있는 화소를 최종적으로 선택한다. 세로방향에 대해서도 가로방향과 동일하게 화소를 선택한다. 이 경우, 선택된 화소들은 가상의 수평선과 수직선 위에 있으므로, 위의 가상의 수평선과 수직선의 수를 얼마로 정하느냐는 밝기변화에 대한 정보를 구하는 화소를 적절하게 선정하기 위한 중요한 파라미터가 된다. 수평선과 수직선의 수가 적어질수록 결함을 놓칠 가능성이 크게 되는 반면, 많아질수록 정보를 구할 필요가 없는 화소가 많이 선택되고 계산량이 늘어나기 때문이다. LCD 전체를 640*480 화소로 착상하여 결함 검출을 수행한 실험에서는 수평선을 15개, 수직선을

20개로 정했을 때, 거의 모든 결함을 검출하면서 계산량을 최소화함을 알 수 있었다. 다음으로, 위와 같이 선택된 화소에서도 정보를 구할 필요가 없는 화소가 아직도 많으며, 가로, 세로 방향에서 선택된 화소들을 조합하여 새로운 화소로 선정하였다. 이 방법은 가상의 수평선과 수직선이 교차하는 교차점으로부터 그 교차점 상하좌우의 인접 교차점까지의 거리 이내에 선택된 화소가 두개 이상인 경우, 이 화소들의 무게중심에 새로운 하나의 화소만을 최종적으로 선정하는 것이다. 또한, 한 개 이하만 경우는 화소값의 공간적인 변화가 급격하지 않은 부분이 되며, 그 화소에서만 공간 변화율을 구하였다.

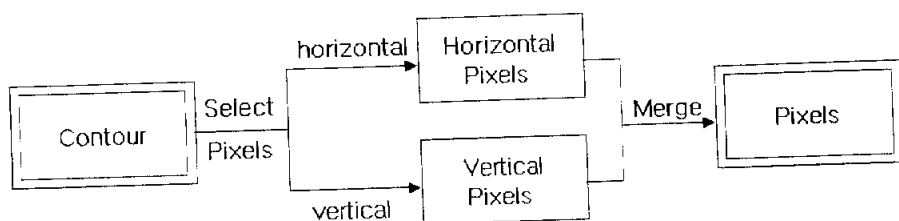


그림 8. 밝기변화에 대한 정보를 구할 화소의 선정

3.2 밝기변화율의 크기와 방향

일반적으로, 밝기변화율은 단위거리 당 밝기변화의 크기를 의미하며, 화상에서는 화소 사이의 거리에 대한 화소값의 차를 나타낸다. 그런데, Contour는 동일한 화소값을 가지는 영역 사이의 경계선을 의미하므로 밝기변화율은 Contour 사이 거리의 역수로 할 수 있다.

제안된 알고리즘에서는 그림 9와 같이 인접 Contour 사이의 수평거리와 수직거리의 역수를 가로방향과 세로방향의 밝기변화율로 각각 구하고, 그림 10과 같이 이들의 벡터합[11]을 구하는 방법을 이용하였다. 그림 10에서 V_x 와 V_y 는 각각 가로방향으로 구한 밝기변화율과 세로방향으로 구

한 밝기변화율, $\bar{V}_{xy}$ 는 밝기변화율의 벡터합, θ 는 밝기가 공간적으로 변하는 방향을 나타낸다. 밝기변화율의 크기와 변화 방향은 수식 (6) 및 (7)를 이용하여 얻을 수 있다.

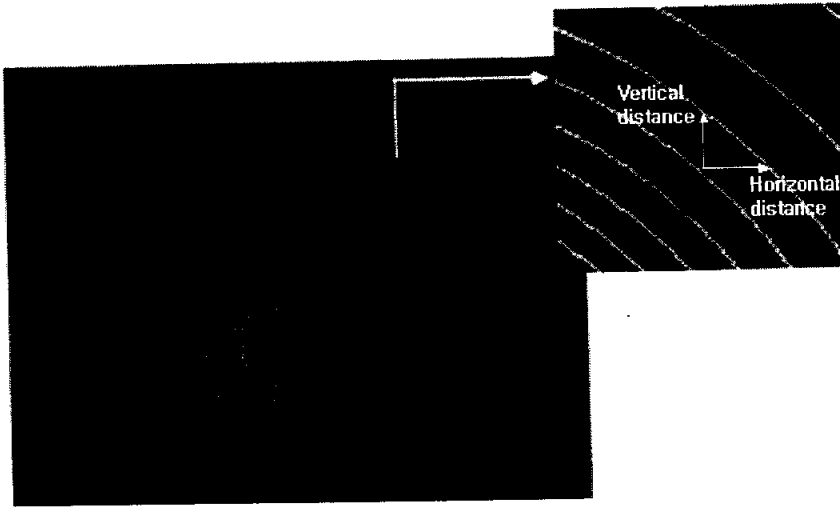


그림 9. Contour 사이의 거리

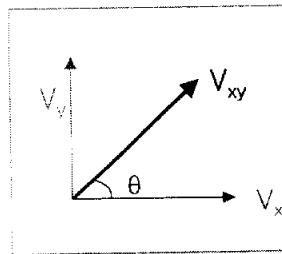


그림 10. 전체 밝기변화율

$$|\bar{V}_{xy}| = \sqrt{|V_x|^2 + |V_y|^2} \quad (6)$$

$$\theta = \tan^{-1}(\bar{V}_y / \bar{V}_x) \quad (-180 < \theta < 180) \quad (7)$$

4. 검출알고리즘을 적용한 결과

이 절에서는 불균일 결함을 갖는 LCD를 촬상한 화상에 제안된 밝기 불균일 결함 검출알고리즘을 적용하여 결함 검출 결과를 보이고, 결함이 있는 LCD를 실제로 촬상한 화상에 밝기 불균일 결함을 검출하는 알고리즘을 적용시키고 그 결과를 분석하였다. 이 때, 그림 11과 같이, 해상도 640*480의 CCD카메라와 Grabber로 구성되어 있는 Vision System을 이용하여 결함이 있는 LCD를 촬상하였다. 이 LCD를 촬상한 6개 화상의 예를 그림 12에 보이며, 이 화상을 실험에 이용하였다.

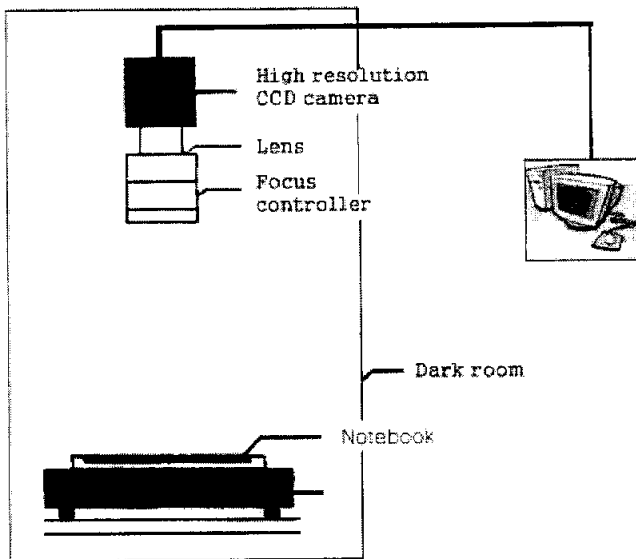
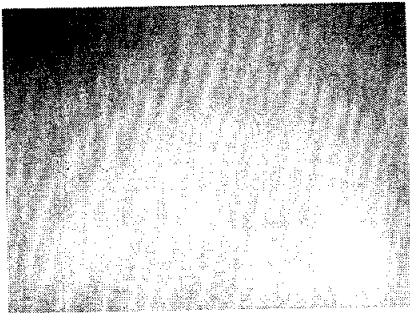


그림 11. 비전 시스템

LCD를 촬상한 화상에서 Contour를 추출하기 위해 Highpass filter를 이용하였으며, 그림 12의 Samplae 1에서 추출된 Contour의 예를 그림 13에 화상으로 나타내었다. 그림 12을 살펴보면 Contour는 기하학적으로 복

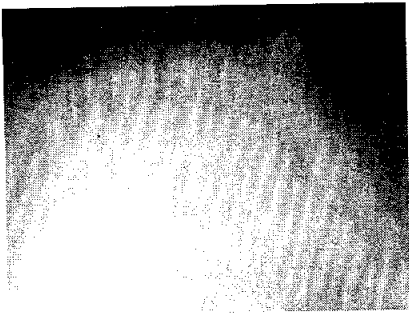
잡하고 굴곡이 심한 형태이며, 이 Contour를 그대로 이용하여 밝기변화율을 구할 경우에는 밝기변화율이 심각하게 왜곡될 수도 있다. 그러므로, Contour를 완만하게 하여 밝기 변화율을 구해야 한다. Contour를 완만하게 만들기 위해서, LCD를 촬상한 화상에 우선 Open과 Close 등의 기하학적 필터[5.6]를 이용하였으며, 완만하게 된 선을 Highpass filter로 추출하였고, 그림 12의 Sample 1에서 추출된 결과를 그림 14에 화상으로 보여주었다.



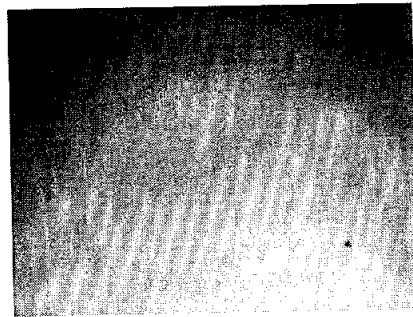
(a) Sample 1



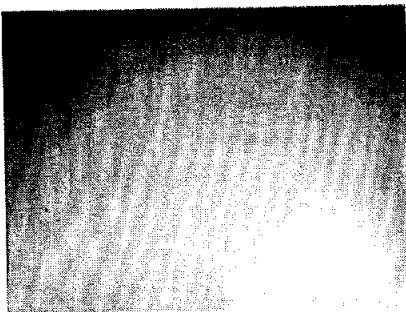
(b) Sample 2



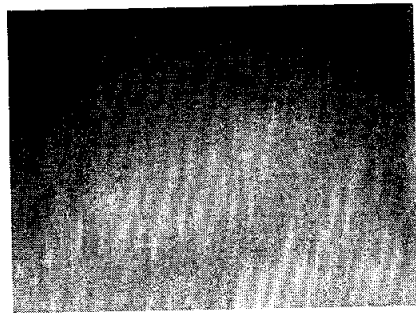
(c) Sample 3



(d) Sample 4



(e) Sample 5



(f) Sample 6

그림 12. LCD를 실제로 촬상한 화상

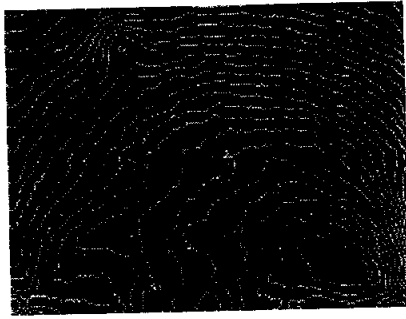


그림 13. 굴곡이 심한 Contour

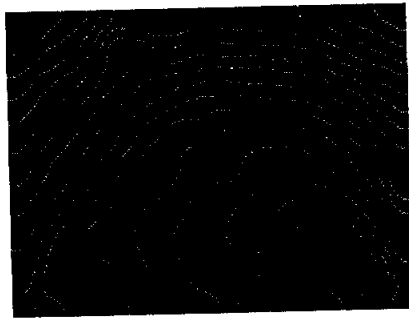
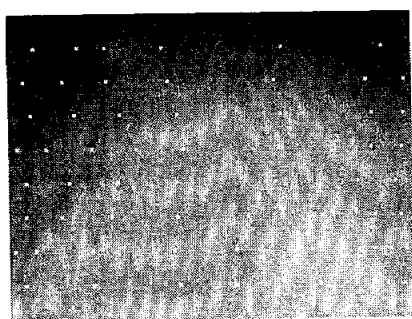
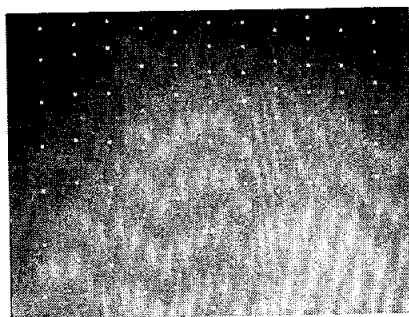


그림 14. 완만한 contour

Contour를 완만하게 한 다음에 이 Contour를 이용하여 밝기변화에 대한 정보를 구하는 화소를 선정하였으며, 그림 12의 Sample 1을 이용하여 가로와 세로방향에 대해서 선정된 화소의 예를 화상 위에 흰 점으로 표시하여 각각 그림 15의 (a)와 (b)에 보여주고, 이들을 조합하여 새롭게 선정한 화소를 같은 방법으로 표시하여 그림 16에 나타내었다.



(a) Horizontal pixels



(b) Vertical pixels

그림 15. 가로와 세로방향에 대해서 선정된 화소

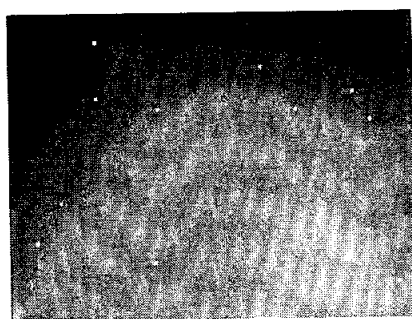
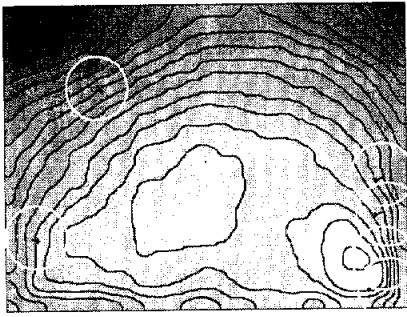


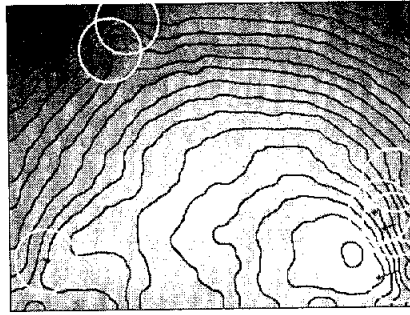
그림 16. 최종적으로 선정된 화소

밝기변화에 대한 정보를 구하는 화소를 선정한 다음에는 선정된 화소마다 밝기변화율의 크기와 밝기가 공간적으로 변하는 방향을 구하였다. 그리고, 구한 밝기변화율의 크기가 정해진 값보다 크다면 이를 결함으로 판정하고, 그 때의 화소에 밝기변화에 대한 정보를 화살표로 나타내며 화소를 중심으로 반지름 50pixel의 점선원으로 결함영역을 표시하였다. 화살표의 길이는 밝기변화율의 크기, 화살표가 가르키는 방향은 밝기가 공간적으로 변하는 방향을 나타내며, 이 때, 결함으로 판정하는 값은 시각적으로

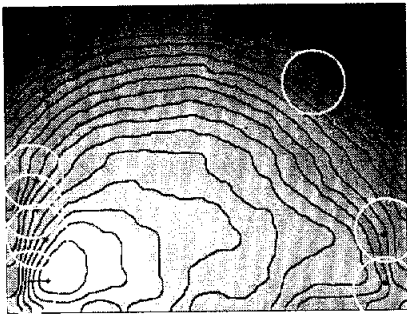
눈에 띄게 보이는 결함영역이 5개 이하가 되도록 정하였고, 결함영역이 겹쳐있을 경우 하나의 결함영역이라고 가정하였다. 결함영역이 5개 이하가 되도록 값을 정한 이유는 검출알고리즘을 적용한 화상에서의 화소값의 공간적인 분포가 완만하기 변하기 때문에 최대 5개 정도면 시각적으로 눈에 띄는 부분을 잘 검출하기 때문이다. 결함으로 판정된 화소 주변에 밝기변화에 대한 정보를 표시한 화상을 그림 17에 나타내었다. 그림 17은 그림 12의 LCD를 촬상한 화상 위에 Contour를 나타내고, 결함으로 판정된 화소 주변에 화살표로 밝기변화에 대한 정보를 표시하고, 점선원으로 결함영역을 표시한 화상이다.



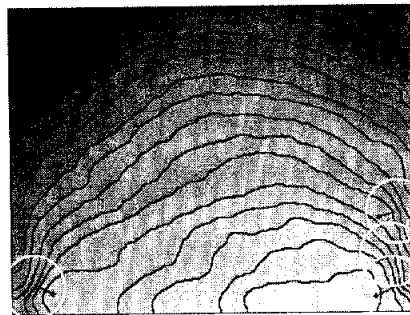
(a) Sample 1



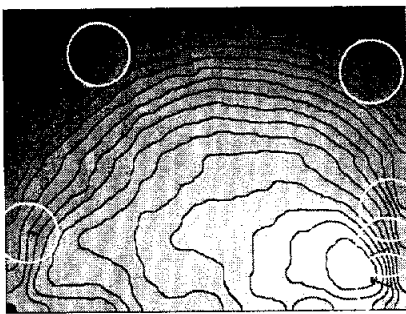
(b) Sample 2



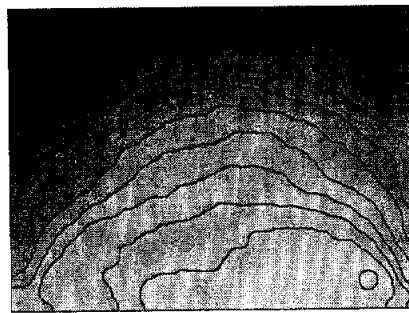
(c) Sample 3



(d) Sample 4



(e) Sample 5



(f) Sample 6

Figure 17. 결함을 표시한 화상

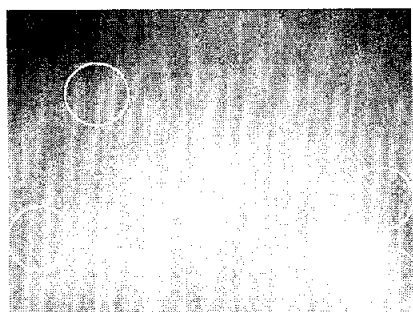
IV. 검출알고리즘의 성능평가

지금까지, 인간의 시각이 밝기의 공간적 변화율에 크게 영향을 받는다는 것을 근거로, Contour를 이용하여 밝기변화율을 구하고, 이 밝기변화율이 정해진 값보다 크다면 밝기 불균일 결함으로 검출하는 알고리즘을 제안하였다. 이 장에서는 검출알고리즘에 의해 결함으로 검출된 부분의 밝기변화율의 크기에 따라 결함이 얼마나 눈에 잘 띄는가를 알아보는 관능실험을 수행하고, 밝기변화율의 크기와 눈에 띄는 정도와의 상관관계를 분석하였다.

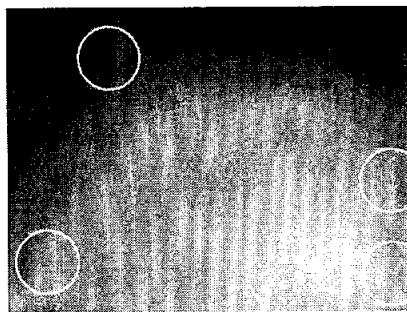
1. 관능실험

관능실험에서는 밝기 불균일 결함이 시각적으로 눈에 잘 띄는가의 정도를 등급으로 나눠서 평가하고, 그 결과가 밝기 변화율의 크기와 어떤 상관 관계가 있는가를 알아보았다. 이 실험에서는 밝기 불균일 결함 검출알고리즘에 이용된 그림 12의 LCD를 촬상한 6개의 화상을 이용하였는데, 이 화상들은 알고리즘에 의해 결함으로 검출된 부분의 밝기변화율 크기가 고른 분포를 갖도록 선정되었다. 이 화상들에서 결함으로 검출된 결함의 수는 20개(그림 18)이고, 17명의 실험참가자에게 설문 조사하는 방법으로 실험을 2회씩 반복하여 총 34회 수행하였다. 화상들은 2장에서와 같이, 70lux 조도의 실험실에서 밝기 불균일 결함이 없는 해상도 1024*768의 15.1 인치의 LCD 상에 표시되었다. 실험방법은 실험참가자에게 LCD 상에 표시된 화상을 보고 결함으로 검출된 부분이 얼마나 눈에 잘 띄는가를 1~7 단계의 등급으로 나누어 평가하도록 하였다. 그런데, 화면의 크기상 6개의 화상을 동시에 비교하면서 평가하는 것이 불가능하므로 화상을 하나씩 관찰하면서 평가하여야 한다. 그러나, 이 경우, 시각적으로 순응현상이 일어나 오차가 발생할 소지가 있다. 여기서는 순응현상에 의한 영향을

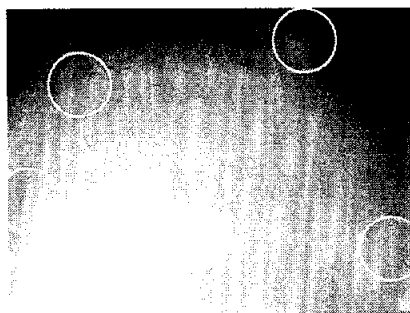
줄이기 위해, 실험참가자들에게 6개의 화상 별로 가장 눈에 잘 띄는 결함을 선정하게 한 후, 그들만을 서로 비교함으로써 각 화상 별로 평가의 기준을 정하였다. 그 다음, 가장 눈에 잘 띄는 것을 기준으로 각 화상 내에서 결함에 등급을 주게 하는 방법을 이용하였다. 실험할 때, 실험참가자에게 결함이 눈에 띄는 정도를 평가할 부분을 안내하기 위해, 그림 17과 같이 화상 위에 50pixel의 원으로 결함영역을 표시하고 결함 별로 알파벳을 붙인 화상을 나눠주었다. 이와 같은 방법으로 실험을 수행한 다음, 각 결함마다 전체 실험회수에 대해 평균하여 등급 평가치를 구하였다.



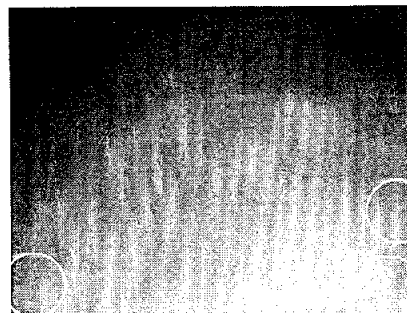
(a) Sample 1



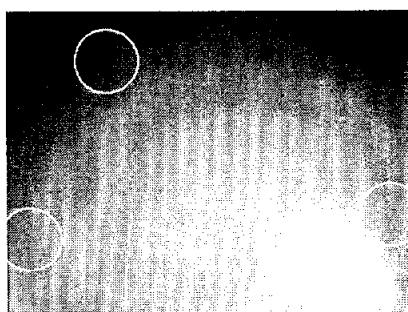
(b) Sample 2



(c) Sample 3



(d) Sample 4



(e) Sample 5

그림 18. 결함영역을 표시한 화상

2. 상관관계를 분석하는 방법

이 절에서는 두 변수 사이의 상관관계를 분석하는 방법들을 알아본다.

두 변수 사이의 관계를 보다 쉽게 관찰하기 위하여 이차원 좌표의 x 와 y 에 각각 두 변수를 두고 그래프를 그리는데, 이와 같이 두 변수의 관찰치를 2차원의 좌표에 나타낸 그래프를 산포도(scatter diagram) 또는 상관도(correlation diagram)라고 한다. 그림 19의 (a)와 같이 산포도에서 한 변수가 커질 때 다른 하나의 변수가 커지는 경향이 있으면, 두 변수 사이에는 양의 상관이 있다고 말한다. 그리고, 한 변수가 커질 때 다른 하나의 변수가 오히려 작아지는 경향이 있으면 산포도가 그림 19의 (b)와 같이 그려지는 경우도 있는데, 이 때에는 변수 x 와 y 사이에 음의 상관이 있다고 말한다. 그런데, 산포도가 그림 19의 (c)와 같다면, 변수 x 와 y 사이에 상관관계가 없다고 말한다.

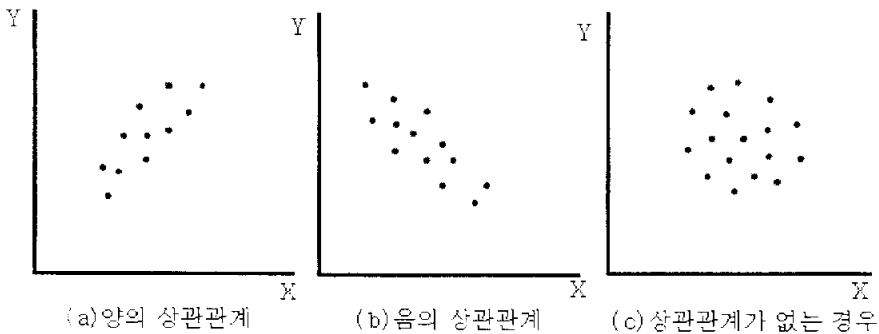


그림 19. 여러 가지 산포도

두 변수 사이에 양 또는 음의 상관이 있는지 파악하는 문제뿐만 아니라 상관의 강도도 문제가 된다. 그림 20의 두 산포도는 두 변수간에 모두 양의 상관이 있는 경우이나, 상관의 강도는 다르다. 관찰치들이 밀집되어 모여 있는 산포도 (a)가 관찰치들이 산만하게 모여있는 산포도 (b)보다 상대

적으로 상관관계가 더 강하다고 말한다.

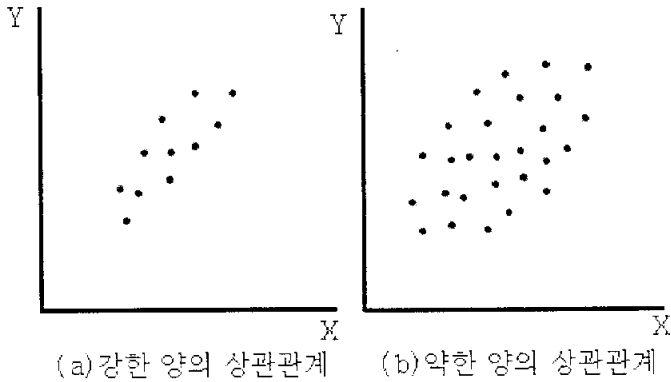


그림 20. 상관관계의 강도

지금까지 살펴본 것과 같이, 상관관계를 파악한다는 것은 두 변수 간에 양 또는 음의 상관이 있는지 조사하고 상관관계가 존재한다면 그 강도를 측정하는 것을 의미한다. 이 때 상관의 방향과 강도를 보여주는 수치를 상관계수(correlation coefficient)라고 한다.

다음에는 상관관계를 분석하는 방법 중 피어슨 상관계수와 회귀 분석에 대해 알아보았다.

2.1 피어슨 상관계수

피어슨 상관계수를 알아보기 전에 먼저 공분산(covariance)이란 개념을 이해할 필요가 있다. 두 평균이 각각 μ_x 와 μ_y 인 확률변수 X 와 Y 의 편차 $(X-\mu_x)$ 와 $(Y-\mu_y)$ 를 곱한 것의 기대치를 X 와 Y 의 공분산이라 하고 σ_{xy} 또는 $\text{Cov}(X, Y)$ 로 적으며, 아래의 수식 (8)과 같다.

$$\sigma_{xy} = \text{Cov}(X, Y) = E[(X-\mu_x)(Y-\mu_y)] \quad (8)$$

만약에 확률변수 X 와 Y 사이에 양의 상관이 있다면, X 와 T 의 편차 $(X-\mu_x)$ 와 $(Y-\mu_y)$ 의 부호가 서로 같을 확률이 높으므로 X 와 T 의 공분산은 양의 값이 된다. 반대로 X 와 Y 사이에 음의 상관이 있다면, X 와 Y 의 편차가 서로 다른 부호를 가질 확률이 높으므로 두 확률변수의 공분산은 음이 된다. 그러므로 두 확률변수 X 와 Y 의 공분산은 상관관계의 방향을 보여주는 하나의 척도가 된다.

그러나 공분산 σ_{xy} 는 X 와 Y 의 측정단위에 따라 값이 달라지는 문제가 있다. 예를 들어 X 가 m으로 측정한 신장이고 Y 가 kg으로 측정한 체중이라 할 때 측정단위를 각각 cm와 g으로 바꾸면 공분산의 값은 10만배가 된다. 그러므로 공분산의 값으로는 상관관계의 방향은 알 수 있으나 상관의 강도는 전혀 파악할 수 없다.

공분산은 확률변수 X 와 Y 의 모집단에서 정의한 것이다. 그러면 확률표본상의 공분산에 대해 알아보면, 확률변수 X 와 Y 의 확률표본이 $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_n, Y_n)$ 이며 X 와 T 의 표본평균이 각각 $\bar{X}$ 와 $\bar{Y}$ 라고 하자. 이때 확률표본상의 공분산 S_{xy} 는 X 와 Y 의 편차를 곱하여 모두 합한 것을 자유도 $n-1$ 로 나누어 구하며, 수식 (9)와 같다.

$$S_{xy} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}) \quad (9)$$

이와 같이 공분산은 상관관계의 방향만을 보여주며 이로써는 상관의 강도를 알 수 없으므로 상관의 방향과 강도를 나타내는 척도가 필요한데, 상관관계의 방향과 강도까지 보여주는 척도가 다음의 수식 (10)과 같이 정의되는 피어슨의 상관계수이며 대부분의 경우에 이를 간단히 상관계수라 말한다.

$$\rho_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (10)$$

여기서, σ_x 와 σ_y 는 각각 X와 Y의 표준편차이며 σ_{xy} 는 위에서 정의했듯이 두 변수의 공분산이다. 그런데 상관계수는 공분산을 두 변수의 표준편차로 나눈 것으로 정의되기 때문에 공분산과 달리 변수의 측정단위가 바뀌더라도 그 값이 달라지지 않는다. 더욱이 상관계수는 항상 $-1 \leq \rho_{xy} \leq 1$ 인 값으로 나타나므로 상관관계의 방향뿐만 아니라 강도까지 보여준다. 즉, ρ_{xy} 의 값이 -1에 가까울수록 음의 상관이 강하며, ρ_{xy} 가 1에 근접할수록 점점 양의 상관이 강하다고 판단한다.

그러면 확률표본상의 상관계수에 대해 알아보기로 하면, 확률변수 X와 Y의 확률표본이 $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_n, Y_n)$ 일 때 표본상관계수 R_{xy} 는 X와 Y의 표본공분산 S_{xy} 를 두 변수의 표준편차 S_x 와 S_y 로 나눈 값이다.

$$R_{xy} = \frac{S_{xy}}{S_x S_y} = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (11)$$

2.2 회귀 분석

회귀분석(Regression)은 변수들 중 하나를 종속변수로 나머지를 독립변수로 하여 변수들 간 상호관계의 본질을 규명하는 통계적 기법이다. 회귀분석은 독립변수들의 개수에 따라 단순회귀분석(simple regression)과 다중회귀분석(multiple regression)으로 구분할 수 있다.

두 변수 X와 Y 사이에 $Y=a+bX$ 와 같은 선형함수관계가 있다고 가정하자. 회귀분석이란 변수의 관찰치를 이용하여 이와 같은 선형함수의 a와 b의 값을 추정하고 추정된 a와 b에 대해 통계적으로 추론하는 분석방법이다. 그런데 Y와 X의 선형함수는 두 변수간의 단순한 상관관계일 수도 있고 두 변수 간의 인과관계인 경우도 있다.

현실적으로 한 변수가 여러 변수와 선형함수관계를 맺고 있는 경우를

가정할 수도 있다. 즉, 변수 사이의 함수형태가 $Y=a+bX_1+cX_2+dX_3+\dots$ 일 때도 흔히 있다. 이러한 일반적 선형함수식에 대한 통계적 추론을 다중선형회귀분석이라 부른다. 그런데 두 변수간의 선형함수 $Y=a+bX$ 에 대한 통계적 추론을 단순선형회귀분석이라 한다. 여기서 X 를 독립변수라 하고 Y 를 종속변수라 부른다.

예를 들어, n 명의 소득수준을 X , 소비지출을 Y 라 두고 소득수준이 높을수록 소비지출도 많을 것이라는 가정하에서 두 변수 사이에 $Y=a+bX$ 와 같은 선형함수관계가 있다고 가정해 보자. 그런데 n 명의 소비지출의 양상이 모두 동일하지는 않을 것이다. 만약에 $a=20$ 이며 $b=0.8$ 이라면, 소득이 $X=300$ 인 사람들은 모두 소비지출이 $Y=20+0.8*300=260$ 인 것이 아니라, 다만 소득이 300인 사람들의 소비지출이 평균적으로 260이라는 의미로 해석해야 할 것이므로, 일반적으로 소득이 300인 사람의 소비지출이 항상 260이지는 않다. 그러므로 i 번째 사람의 소득과 지출이 각각 X_i 와 Y_i 라 할 때 개인의 지출 Y_i 와 지출의 평균 $a+bX_i$ 의 차 $u_i=Y_i-(a+bX_i)$ 와 지출의 평균 $a+bX_i$ 를 합하면 반드시 Y_i 와 일치한다. 그러므로 i 번째 개인의 소득과 소비 사이에는 일반적으로 다음의 수식 (12)와 같은 관계가 성립한다.

$$Y_i = a + bX_i + u_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (12)$$

여기에서 이 식을 $Y=a+bX$ 의 확률모형이라 하고 u_i 를 오차항(error term) 또는 교란항(distribution term)이라 부른다. 다음의 그림 21에서 보는 것처럼 관찰치가 함수 $Y=a+bX$ 의 위에 위치하면 u_i 는 양이며, 관찰치가 직선의 밑에 위치하면 u_i 는 음으로 나타난다.

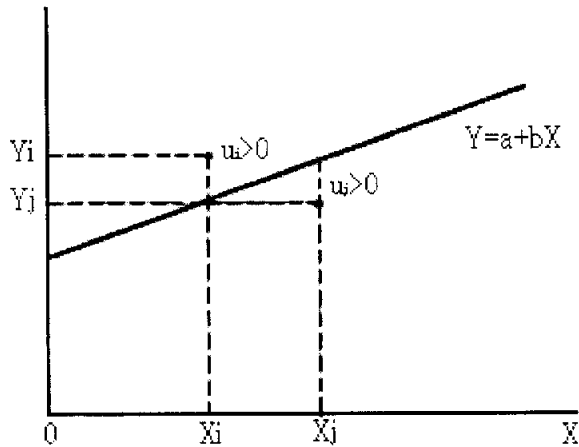


그림 21. 오차항

3. 실험결과

앞 절의 실험결과는 표 1과 같으며, 밝기변화율에 대한 등급평가치의 관계를 그림 22에 그래프로 도시하였다. 그림 22에서 x 축과 y 축은 각각 밝기변화율과 등급 평가치를 나타낸다. 일반적으로 1장 1절의 그림 1과 같이, 시각의 반응이 Weber-Fechner의 법칙으로 잘 알려진 자극과 반응의 법칙과 유사하다는 것을 근거로, 밝기변화율에 대한 등급평가치의 관계를 대수적 곡선을 이용하여 추정하여 보았다. 이 대수적 곡선은 Curve fitting을 해서 그림 22에 점선으로 나타내었는데, 이 때, Curve fitting하는 대표적인 방법 중 최소자승오차를 이용하는 방법을 이용하였다. 최소자승오차를 구하는 식은 수식 (13)과 같으며, 수식 (14)에서 이 값이 최소가 될 때의 상수 a , b 값을 구하였다. 수식 (13)에서 e 는 최소자승오차, N 은 결함 개수, G 는 실험으로 얻은 등급 평가치, γ 는 밝기변화율, g 는 등급 평가치를 나타내고, 수식 (14)에서 γ 는 밝기변화율, g 는 등급 평가치를 나타낸다.

$$e = \sum_{i=1}^N (G_i - g_i) \quad (13)$$

$$g(\gamma) = a \ln \gamma + b \quad (14)$$

이와 같은 방법으로 구한 Curve fitting한 식은 수식 (15)와 같은 방법으로 구한 Curve fitting한 식은 수식 (15)와 같다.

$$g(\gamma) = 5.6027 \ln \gamma + 16.83 \quad (15)$$

그림 22를 직관적으로 보면, Fitting된 곡선 가까이에 등급 평가치가 위치하고 있다는 것을 볼 수 있고, 등급 평가치가 단조증가할 것으로 예상했다. 그런데, 큰 값을 갖는 밝기변화율의 등급 평가치가 그보다 작은 밝기변화율의 등급 평가치보다 작게 평가된 경우를 볼 수 있었다. 이 경우는 같은 크기의 밝기변화율을 갖고 있더라도 주위에 존재하는 결함이나 밝기의 분포특성에 따라 시각적으로 눈에 띄는 정도가 다르게 되는 현상에서 발생되었다고 추정될 수 있다.

Image	Defect	Spatial gradient	Mean of measure(G)
Sample 1	a	0.0632	1.12
	b	0.0703	2.06
	c	0.0819	3.35
	d	0.1379	5.53
Sample 2	a	0.0624	1.24
	b	0.0944	3.53
	c	0.0694	2.47
	d	0.1320	5.00
Sample 3	a	0.1440	6.53
	b	0.1253	4.82
	c	0.1042	3.71
	d	0.1368	5.59
	e	0.0867	3.06
Sample 4	a	0.1108	4.88
	b	0.0982	3.53
	c	0.1090	3.88
Sample 5	a	0.0761	3.12
	b	0.0714	2.71
	c	0.1506	6.65
	d	0.1209	5.06

Table 1. 결함에서의 밝기변화율에 대한 등급 평가치

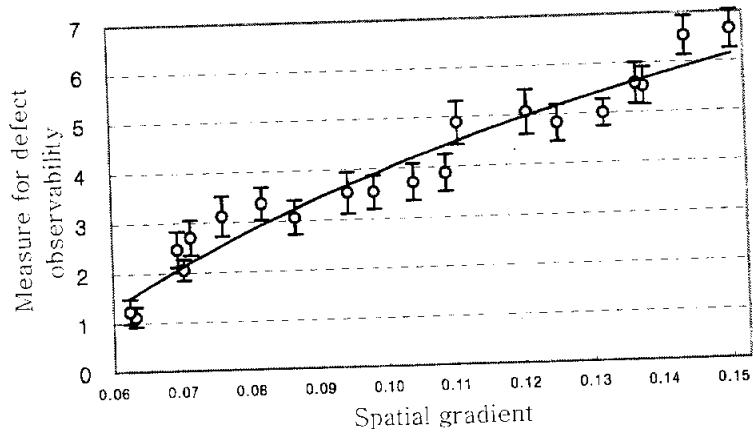


그림 22. 결함에서의 밝기변화율에 대한 등급 평가치

V. 결론

디스플레이 장치에 존재할 수 있는 불균일한 밝기가 인간에게 관찰될 때에는 불균일한 밝기의 차이나 공간적 분포 등에 따라 다양한 형태의 얼룩으로 보이며, 이 얼룩은 화질의 열화 등의 시각적으로 불쾌감을 주는 결함으로서 제거되어야 한다. 이를 위해, 본 논문에서는 디스플레이 장치의 밝기 불균일 결함을 검출하는 알고리즘을 제안하였다. 결함 여부는 인간의 눈에 불균일한 밝기가 어떻게 보이느냐로 최종적으로 결정되므로, 검출알고리즘을 제안하기에 앞서 밝기 불균일성을 나타내는 파라메타인 밝기편차와 밝기변화율에 따른 불균일한 밝기의 시인성을 조사하는 관능실험을 하였다. 그 결과, 불균일한 밝기가 시각적으로 눈에 얼마나 잘 띄는가는 밝기의 공간적 변화율에 크게 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다. 관능실험의 결과를 근거로, Contour를 이용하여 밝기 불균일 결함을 검출하는 알고리즘을 제안하였으며, LCD를 실제로 촬상한 화상에 검출알고리즘을 적용해본 결과를 통해 인간의 눈에 띄는 불균일한 밝기가 효과적으로 검출된 것을 볼 수 있었다. 이를 실제 검사원이 시지각에 의해 검출한 결과와 비교하였을 때, 실제 생산 라인에서 시각적 결함 검사를 수행하는 검사원들에 의해 검출된 결함을 전부 포함하는 결과를 보였다. 또한, 검출알고리즘에 의해 결함으로 검출된 부분의 밝기변화율 크기에 따라 결함이 얼마나 눈에 잘 띄는가를 알아보는 관능실험을 수행하였는데, 밝기변화율의 크기가 증가함에 따라 결함이 눈에 더 잘 띈다는 것을 알 수 있었다. 따라서, 제안된 검출알고리즘이 밝기 불균일 결함을 자동으로 검출하는 방법으로 이용될 수 있을 것이다.

VI. 참고 문헌

- [1] Y. Mori, K. Tanahashi, R. Yoshitake-shi, S. Tsuji, Extraction and Evaluation of Mura Images in Liquid Crystal Displays, Proceedings of SPIE, 4471, pp. 299-306, 2001
- [2] Fumihiko Saitoh, A Method for Detecting Pixel Defects in LCD Visual Inspection System, Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 63, No.4, pp520-524, 1997
- [3] Saitoh, F., Uneven Area Defects Inspection on LCD Display Using Multiple Resolute Images, Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 63, No.5, pp.647-651, 1997
- [4] Ulrich Eisemann, Influence of Spatial Luminance Interactions on Perceived Brightness, Proceedings of SPIE, 4300, pp184-190, 2001
- [5] Colin Martindale, Cognitive psychology, 1994
- [6] Christopher D. Wickens, Sallie E. Gordon, Yili Liu, An Introduction to Human Factors Engineering, 1998
- [7] Robson, J. G. & Graham, N., Probability summation and regional variations in contrast sensitivity curves across the visual field, Vision Research, 21, pp.408-418, 1981

- [8] Wilbur B. Davenport Jr., Probability and Random processes, 2000
- [9] Gregory A. Baxes, Digital Image Processing: Principles and applications, 1994
- [10] Arthur Weeks, Fundamental of Electronic Image Processing, SPIE/IEEE Series on Imaging Science & Technology, 1998
- [11] Grant B. Gustafson, Calvin H. Wilcox, Analytical and Computational Methods of Advanced Engineering Mathematics, 2000
- [12] 윤일홍, 이시영 공저, 현대통계학, 1999