

Thin Film Micromirror Array 검사 장치의 교정

정희원 이 은 숙*, 이 병 옥**

Calibration of a Thin Film Micromirror Array Inspection System

Eun-Sook Lee*, Byung-Uk Lee** *Regular Members*

요 약

차세대 고휘도 대화면 디스플레이 장치로 연구되고 있는 TMA (Thin-film Micromirror Array)에서 mirror의 불균일성으로 인하여 영상 재현에 화질열화가 발생할 수 있다. 따라서 TMA 검사 장치를 사용하여 보정계수를 측정하여야 한다. 본 논문에서는 기하학적 왜곡을 측정하고 보정하여 위치 오차를 한 화소 미만으로 감소시키는 방법을 제안하였다. 영상 취득장치의 감도를 측정하고 보정하여 CCD 카메라로 측정된 값에서 광량을 계산하였다. 또한 입력된 영상의 잡음을 측정하여 이 시스템의 측정 신뢰도를 구하였고 이를 사용하여 보정계수의 적정 비트 수를 계산하였다. 본 논문에서 설계된 TMA 검사 시스템을 사용하여 mirror의 불균일성에 의한 영향을 보정할 수 있다.

ABSTRACT

TMA (Thin-film Micromirror Array) is under development as a next generation display due to its merits of high brightness at large screen size. Calibration for TMA mirror variation will enhance the image quality. We propose a geometric calibration method which has subpixel accuracy. We measured the gamma of the CCD camera to calculate the optical power from the camera output. We measured the camera image noise and the size of the bits of the calibration factor was calculated based on the image noise. The calibration method developed in this paper will be applied to the TMA inspection system.

1. 서 론

최근에는 대형 디스플레이 장치에 대한 요구가 높아지면서 고휘도 대형의 화면을 표시할 수 있는 차세대 디스플레이 장치들이 연구되고 있다. 이러한 장치들은 일반적인 반도체 공정을 이용하여 실리콘 기판 위에 구조물을 제작하므로 소형화와 더불어 대량생산에 따른 제조단가의 절감 효과와 함께 성능의 획기적인 개선을 기대할 수 있다.

이러한 투사형 화상 표시 장치들에는 DMD (Digital Micromirror Devices or Deformable Micromirror Display), GLV (Grating Light Valve), TMA(Thin-film Micromirror Array) 등이 있다.

이들은 화면의 화소 하나에 해당하는 미소거울이나 이에 해당하는 구조물을 2차원의 격자 형태로 배열하여 전체 화면을 구성하고 이들을 입력되는 화상신호에 따라 개별적으로 구동함으로써 입사광을 반사나 회절하여 각각의 밝기를 표현함으로써 스크린에 투사하는 방식을 사용한다.

대우전자에서 개발하고 있는 TMA는 TFT (Thin Film Transistor) 위에 구성된 소형 거울 배열로 이루어져 있다. 이 소형 거울 (micromirror)이 화소에 대응한다. 개개의 화소들은 압전 세라믹 성분을 포함하고 있어서 영상의 밝기에 비례하는 인가전압에 따라서 TFT가 동작하면서 형상의 변이가 발생하고, 이 변이량이 거울의 반사각도를 다르게 하여 빛의

* 이화여자대학교 정보과학대학원, **이화여자대학교 전자공학과(bulee@mm.ewha.ac.kr)

논문번호 : 98100-0305, 접수일자 : 1998년 3월 5일

*본 연구는 대우전자 TMA 연구소의 지원을 받아 수행한 연구결과의 일부입니다.

반사량을 조절한다 (그림 2). 이런 동작을 하기 위해서 화소 배열은 외팔보 (cantilever) 형태의 특별한 구조를 갖게 되는데 이 구조는 반도체에 특수한 제조공정을 추가하여 만든다.

그러나, TMA 제조 공정상 수십 만개의 TMA mirror가 초기에 동일한 평면도를 갖기는 대단히 어렵다. 이 불균일성은 결국 빛의 반사량을 원하는 양만큼 조절할 수 없게 하여 화상 열화의 주요 원인으로 작용하게 된다. 전체 구조물이 간단하고 제작이 편리하지만 박막으로 제조하여 반도체 공정으로 형상화할 때 발생하는 히스테리시스 현상 및 거울 평면의 불균일성 문제는 해결되어야 할 과제이다 (1-4)

그러므로 본 논문에서는 반도체 제조공정상 발생하는 TMA mirror의 초기 고유각과 인가 전압에 따른 구동각도의 변화 등의 영향을 보정하기 위해 사용되는 TMA 검사 시스템을 광학적으로 검사하는 방법을 제안하였다.

II장에서는 TMA 검사 시스템의 구조를 설명하고, 검사 알고리즘을 제시하였다. III장에서는 기하학적 왜곡을 보정하기 위한 비선형 교정방법을 제시하였다. 여기에서 Tsai⁽⁷⁾가 제안하여 널리 사용되는 최소자승법에 기초한 교정방법이 충분한 교정을 하지 못하여 새로운 비선형 교정방법을 적용하였다. IV장에서는 카메라에 들어오는 광량과 출력전압 간의 비선형성을 모델링하는 감마를 측정하고, V장에서는 영상잡음(noise)을 측정하였다. 이 영상잡음은 TMA 교정 계수의 정확도의 한계를 나타내므로, 교정계수의 비트수를 계산하는데 사용된다. VI장에서는 결론을 제시하였다.

II. TMA 검사 시스템의 구조 및 검사 알고리즘

TMA 검사 시스템은 TMA 패널을 스크린 면에 투사하고, 스크린 면에서의 광분포와 결함 (defect) 등을 측정하는 장치로 설계하였다. 교정밀도의 CCD 카메라와 frame grabber를 사용하여 TMA 패널의 구동측정장치를 구성하였다.

그림 1에서와 같이 TMA 패널의 영상은 광학계를 거쳐서 스크린에 투사되고, 이 영상이 다시 CCD 카메라로 입력된다. 또한 TMA 영상에 나타나는 수십 만개의 TMA 화소들은 각각 TMA mirror에 대응된다. TMA mirror에 전압이 가해지면 압전 물질 (piezoelectric material)의 특성에 따라 mirror의 기울기가 변하게 된다.

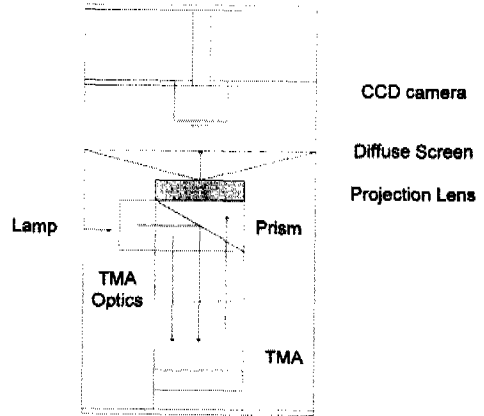


그림 1. TMA 검사 시스템의 개요도

그리고 mirror의 기울기로 인해 광 stop을 통과하는 빛의 양이 달라지게 되고, 이것이 영상을 구성하는 한 화소의 밝기를 나타내게 된다 (그림 2).

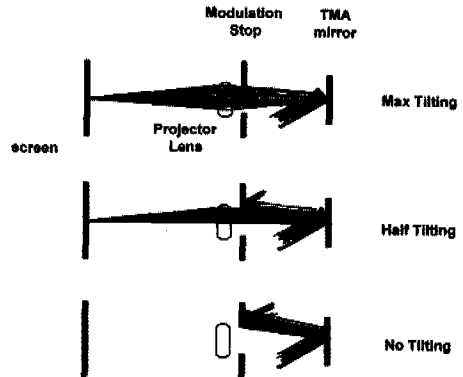


그림 2. TMA의 구동원리

먼저 TMA 패널을 검사하기 위해서 각 화소의 광량을 측정한다. 수십 만개의 mirror로 구성된 TMA 패널의 영상은 1000×1018의 해상도로 A/D 변환되어 CCD 카메라에 입력된다. 이때 TMA 화소에는 검사장비의 calibration을 통한 위치보정 및 밝기 보정이 필요하게 된다. 우리는, TMA 화소의 위치 보정을 위해서 광학계의 기하학적 왜곡을 측정하고, 밝기 보정을 하기 위해서 카메라의 감마를 측정하였으며, 또한 noise를 측정하여 밝기 측정오차를 계산하였다.

III. 기하학적 왜곡의 보정 방법

카메라를 통하여 측정된 영상 점들 (image points)은 기하학적 왜곡이 발생하여 이상적인 위치

로부터 변형되어 나타난다. 이 위치 오차 (position error)는 카메라 광학 시스템 (camera optical system)의 불완전성의 결과로 발생하게 되며, 위치 오차의 크기는 일반적으로 위치에 따라 변한다^[5,6].

왜곡에 의한 위치적 이동은 주로 광축으로부터 방사형 방향 (radial direction)으로 나타나며 이를 radial 왜곡이라고 한다. 산업계에서 사용되는 영상 측정 장비에서는 안정된 계산을 위하여 radial 왜곡만이 고려된다^[4]. 본 논문에서도 카메라의 왜곡을 측정하기 위해 radial 왜곡을 이용하여 모델링하였다.

radial 왜곡은 이상적인 위치로부터 안쪽으로 또는 바깥쪽으로의 이동 (displacement)을 발생시킨다. 그리고 이러한 형태의 왜곡은 주로 흠이 있는 방사형 곡률 (flawed radial curvature)에 의해 생긴다. 음의 방사형 이동 (negative radial displacement)을 barrel 왜곡이라고 하며, 점들이 바깥쪽에 위치할수록 모이는 형태를 나타내고, 크기는 감소한다. 또한 양의 방사형 이동 (positive radial displacement)을 pincushion 왜곡이라고 하며, 바깥쪽에 위치한 점들일수록 퍼지는 형태를 나타내고, 그 크기는 증가한다. 그리고 이 radial 왜곡은 광축에 대해 정확하게 대칭이 된다^[5].

기하학적 왜곡의 검사는 일정한 간격의 격자 패턴이 CCD 카메라에 입력된 영상의 왜곡정도를 측정하여 이루어진다. 본 논문에서는 카메라를 통해 입력된 2차원 격자 영상을 사용하여, 취득된 영상으로부터 왜곡이 일어나지 않은 이상적인 격자 패턴을 만들고 이 패턴들 사이의 관계를 정의하는 왜곡계수를 계산하여 광학계의 왜곡 특성을 분석하고 광학계의 왜곡을 모델링하였다.

1. 왜곡 측정을 위해 사용된 영상

일정한 격자 간격을 가진 세 개의 영상에서 나타나는 교점을 왜곡의 측정점 (calibration point)으로 이용할 수 있다.

격자 영상은 TMA 패널 위치에 TMA 패널 sample (diced lined wafer 영상, 폭 3mm dicing, 선폭 50-100 μ m)을 놓고 CCD 카메라로 찍은 것으로, 이 영상에는 TMA 광학계의 왜곡과 카메라 광학계의 왜곡이 합쳐서 나타난다 (그림 3). NTSC 격자 영상은 스크린에 NTSC 카메라 측정용 패턴을 놓고 CCD 카메라로 찍은 영상으로 카메라 광학계의 왜곡만이 나타난다 (그림 4). TMA sample은 TMA 광학계의 왜곡을 측정하기 위해서 64.1mm x 48.1mm의 패널 위에 16x12개의 TMA 화소를 일

정한 간격으로 배열하여 제작한 것이다. TMA sample을 CCD 카메라로 얻은 영상에는 광학계와 카메라에 의한 왜곡이 나타난다 (그림 5).

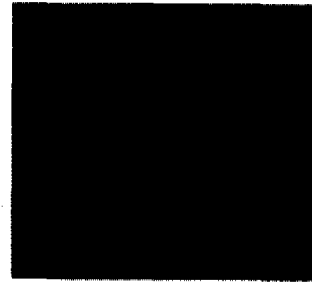


그림 3. 격자 영상

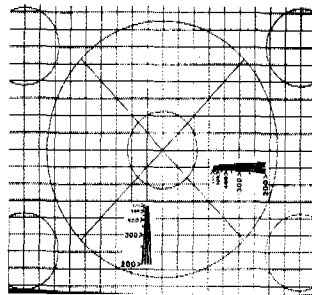


그림 4. NTSC 격자 영상

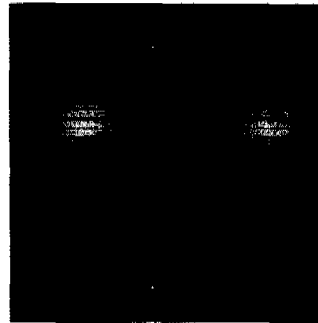


그림 5. TMA sample 영상

2. TMA 광학계의 왜곡 측정 알고리즘

왜곡이 없는 이상적인 격자 패턴을 만들기 위해 격자 패턴의 교점을 정확히 계산한다. 격자 패턴의 경우 격자선의 위치를 무게 중심을 이용하여 정수가 아닌 소수로 얻어 정밀도를 높이고, 이 선의 교점을 격자의 교점으로 정한다. TMA sample 영상의 경우 가장 밝은 화소를 중심으로 수직, 수평방향의 무게 중심을 계산하여 격자의 교점으로 정한다. 그리고

영상 중심의 데이터를 사용하여 격자의 간격, 격자의 기울기를 구하여 왜곡이 없는 이상적인 격자 패턴을 만든다.

이러한 방법으로 구해진 이상적인 격자 패턴과 왜곡이 발생한 격자 패턴 사이의 대응관계를 모델링하고 왜곡 계수를 구한다. 또한 왜곡이 발생한 격자 패턴의 교점에 측정된 왜곡 계수를 대입하여 새로운 이상적인 격자 패턴의 교점을 만든다. 이렇게 두 가지 방법에 의해 구해진 격자 교점의 위치는 매개변수 (parameter)의 측정오차로 인해서 다르게 나타난다. 그리고 이 매개변수들은 비선형 관계식을 만족하므로 수치해석에서 널리 사용되는 Levenberg Marquardt 방법을 이용하여 측정오차를 최소화하는 매개변수를 계산한다. 이 방법은 어떤 모델이 미지의 매개변수 $a_k, k=1,2,\dots,m$ 에 대해서 비선형 관계를 만족할 때, x^2 합수를 정의하고 이 합수를 최소화함으로써 파라미터를 추적하는 방법이다^[8]. TMA 화소의 실제 위치는 취득된 영상의 2차원 좌표 값에 왜곡 계수를 대입하여 얻을 수 있다.

1) 왜곡이 없는 격자패턴을 만드는 방법

영상의 중앙에서는 왜곡이 거의 일어나지 않고, 중심에서 바깥쪽으로 갈수록 왜곡의 크기가 커지므로 영상 중앙의 데이터들을 이용해서 왜곡이 없는 격자 패턴을 만든다. 이렇게 만들어진 격자 패턴을 왜곡이 발생한 격자 패턴과 비교하면, 광학계 내에서의 왜곡의 영향을 분석할 수 있다.

영상 중심의 데이터를 사용하여 격자의 간격, 격자의 기울기를 정도를 구하고 왜곡이 없는 이상적인 격자 패턴을 만들었을 때, 패턴의 교점 (X_u, Y_u) 은 식 1과 같이 계산할 수 있다. (i, j) 는 격자 교점의 위치이며, (L_x, L_y) 는 격자의 간격을 나타내고, θ 는 격자 패턴의 기울기이며, (X_0, Y_0) 는 optical center (광축과 영상 평면의 교선)의 좌표이다.

$$X_u = iL_x \cos \theta - jL_y \sin \theta - X_0$$

$$Y_u = iL_x \sin \theta + jL_y \cos \theta - Y_0 \quad (1)$$

2) 기하학적 왜곡 모델링 계수 계산 방법

영상 상에서 왜곡이 있는 실제 좌표와 왜곡이 없는 가상의 좌표를 얻은 후에, 다음과 같은 방법으로 모델링 하여 왜곡 모델링 계수를 계산한다. 영상 평면상에서 실제의 왜곡이 일어난 (true distorted) 영상 좌표를 (X_d, Y_d) , 가상의 왜곡이 없는 (ideal

undistorted) 영상 좌표를 (X_u, Y_u) , 왜곡의 크기를 D_x, D_y 라 할 때, radial 렌즈 왜곡은 식 2와 같이 표현된다. 그리고 렌즈 왜곡을 모델링 하기 위해서 계산되어야 하는 매개변수는 왜곡 계수 k_1 이다. 이 때 k_3, k_4, \dots 등은 고려하지 않아도, 영상 점들의 위치적 이동을 정확히 표현하는데 충분하다^[5-7,9].

$$X_d + D_x = X_u$$

$$Y_d + D_y = Y_u$$

$$D_y = Y_d(k_1 r^2 + k_2 r^4 + \dots)$$

$$D_x = X_d(k_1 r^2 + k_2 r^4 + \dots)$$

$$r = \sqrt{X_d^2 + Y_d^2} \quad (2)$$

그런데, 격자 패턴의 교점이 N개라고 할 경우 각각의 교점들이 두 개의 식을 만족하므로 2N개의 방정식이 만들어진다 (식 3). 2N개의 방정식을 모두 만족하는 k_1, k_2 를 구할 수는 없으므로, 최소자승법을 이용하여 오차가 최소로 되게 하는 k_1, k_2 를 구한다 (식 4).

$$X_{di} r_i^2 k_{1i} + X_{di} r_i^4 k_{2i} = D_{xi}$$

$$Y_{di} r_i^2 k_{1i} + Y_{di} r_i^4 k_{2i} = D_{yi} \quad (3)$$

($i=1,2,3,4,\dots,N$)

$$\begin{bmatrix} k1 \\ k2 \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^N \begin{bmatrix} X_{di}^2 r_i^4 + Y_{di}^2 r_i^4 & X_{di} r_i^6 + Y_{di} r_i^6 \\ X_{di} r_i^6 + Y_{di} r_i^6 & X_{di}^2 r_i^8 + Y_{di}^2 r_i^8 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \sum_{i=1}^N \begin{bmatrix} X_{di} r_i^2 D_{xi} + Y_{di} r_i^2 D_{yi} \\ X_{di} r_i^2 D_{xi} + Y_{di} r_i^2 D_{yi} \end{bmatrix} \quad (4)$$

이와 같은 방법으로 계산한 왜곡 계수 k_1, k_2 값을 사용하면, 왜곡이 생긴 영상에서 각 점의 왜곡 (D_x, D_y) 을 구할 수 있게 된다.

3) Levenberg Marquardt 방법을 이용한 매개변수 보정방법

우리는 영상 중심의 데이터를 사용하여 왜곡이 없는 이상적인 격자 패턴을 만들었다. 왜곡이 발생한 격자 패턴의 교점에 측정된 왜곡 계수를 대입하면 (식 5) 새로운 이상적인 격자 패턴의 교점 (X_u, Y_u) 을 만들 수 있다. k_1, k_2 는 왜곡 모델링 계수이며, X_0, Y_0 는 optical center의 좌표이다.

$$X'_u = (X_d - X_0) + (X_d - X_0)k_1r^2 + (X_d - X_0)k_2r^4$$

$$Y'_u = (Y_d - Y_0) + (Y_d - Y_0)k_1r^2 + (Y_d - Y_0)k_2r^4 \quad (5)$$

위의 두 가지 방법에 의해 계산된 왜곡이 없는 격자 교점의 위치는 매개변수의 측정 오차로 인해서 다르게 나타난다. 그리고 이 매개변수들은 비선형 관계식을 만족하므로 Levenberg Marquardt 방법을 이용하여 측정 오차를 최소화시킴으로써 정확도를 높일 수 있다.

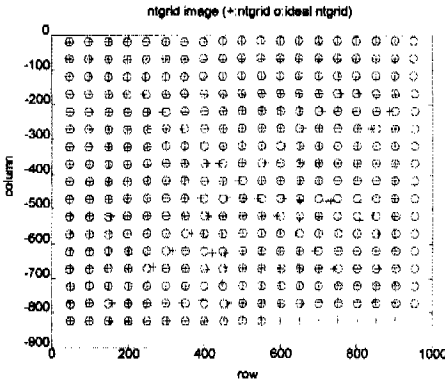


그림 6. NTSC 격자 패턴의 교점(o)과 왜곡이 없는 NTSC 격자 패턴의 교점(+) 위치

매개변수를 구할 모델이 $y(x; a) = y'(x'; a')$ 일 때, χ^2 함수는

$$\chi^2(a) = \sum_{i=0}^N \left[\frac{y(x_i; a) - y'(x'_i; a')}{\sigma_i} \right]^2$$

$$= \sum \frac{1}{\sigma^2} \left[[y_x(x; a) - y'_x(x'; a')]^2 + [y_y(x; a) - y'_y(x'; a')]^2 \right] \quad (6)$$

으로 표현될 수 있다. 여기서 a는 $L_x, L_y, \theta, k_1, X_0, Y_0, k_1, X_0, Y_0$ 로 최적화될 매개변수이며, 본문에서는 Levenberg Marquardt 방법을 통해서 왜곡 계수 측정시에 사용된 매개변수의 측정오차를 최소화할 수 있었다.

3. TMA 광학계의 왜곡 모델링 결과 분석

1) 왜곡 형태 (distortion type)

NTSC 격자 영상에는 카메라 광학계의 왜곡이 나타난다. 왜곡은 그림 6에서와 같이 barrel 왜곡의 형태를 보였다. 또한 TMA 광학계와 카메라 광학계의 왜곡이 합쳐서 나타나는 격자 영상의 왜곡은 그림 7에서와 같이, pincushion 왜곡이 나타났다. 이 결과로부터 TMA 광학계에서 발생하는 pincushion 왜곡이 카메라에서 발생하는 barrel 왜곡보다 크다는 것을 알 수 있다.

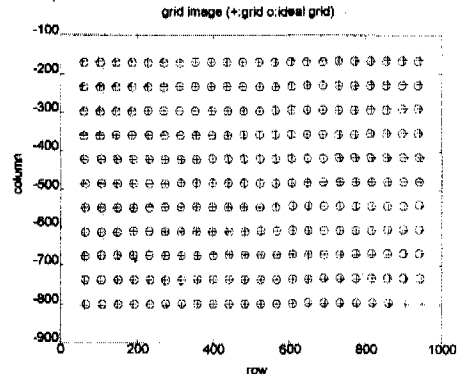
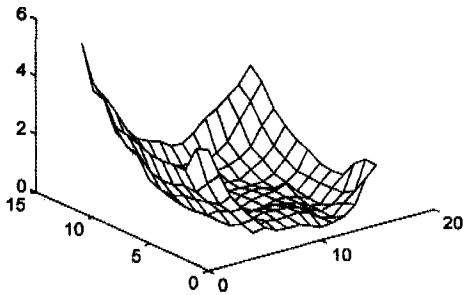


그림 7. 격자 패턴의 교점(o)과 왜곡이 없는 격자 패턴의 교점(+) 위치

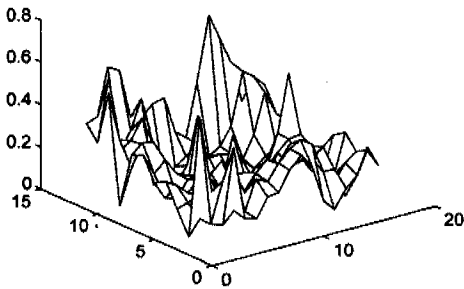
표 1. 제안한 방법을 이용해서 구한 매개변수 보정값

교정 변수	TMA Sample image		grid image	
	최소자승법	제안한 방법	최소자승법	제안한 방법
L_x	60.87	60.88	41.70	41.76
L_y	60.89	60.85	41.76	62.67
θ	-0.00053	-0.000414	-0.00771	-0.0075
X_0	487.15	495.55	418.89	424.60
Y_0	365.06	293.39	247.86	325.79
K_1	-1.80×10^{-9}	-2.00×10^{-8}	-4.12×10^{-8}	-3.25×10^{-8}
X_c	530.07	538.16	480.57	485.70
Y_c	549.80	478.47	420.07	498.39
error	1.17 ± 1.06	0.30 ± 0.66	0.79 ± 0.72	0.18 ± 0.13
Max error	5.57	0.73	3.63	0.99

2) 렌즈 왜곡 계수의 계산



(a) 최소자승법으로 교정한 후의 위치 오차



(b) 제안된 방법으로 교정한 후의 위치오차

그림 8. TMA화소의 위치보정에 따른 잔류오차 비교

격자 영상과 TMA sample 영상의 경우 TMA 광학계와 카메라에 의한 왜곡이 나타난다. TMA sample 영상과 격자 영상에 대해서 기존에 널리 사용되는 Tsai⁽⁷⁾가 제안한 방법을 사용하여 교정한 후에도 위치오차가 수 pixel 이상이 되어서 사용불가능하였다. 이는 Tsai의 방법이 보정계수를 y 방향의 이동, 회전성분, 광축 방향의 이동과 렌즈 왜곡 계수의 순으로 순차적으로 구하고 최소자승법을 사용하므로 교정효과가 낮은 것으로 분석된다. 본 연구에서는 모든 관련 교정 인자들을 모두 포함한 식 (6)을 Levenberg Marquardt 방법을 이용하여 비선형 최적화 결과를 구하였다. 이 방법은 수식의 1차 미분만 계산하면 되고 2차 미분이 필요 없어서 알고리즘이 간단하고 수렴속도도 상당히 빠르기 때문에 널리 사용된다⁽⁸⁾. 두 가지 방식을 적용하여 비교한 결과는 표 1과 같다. 왜곡 모델링 매개변수의 보정 결과를 볼 때, TMA sample 영상의 경우는 -1.80×10^{-9} 에서 -2.00×10^{-8} 로, 격자 영상의 경우는 보정 후에 -4.12×10^{-8} 에서 -3.25×10^{-8} 로 보정되었

다. 또한 두 가지 방법으로 각각 구한 격자 교점 위치를 비교해 볼 때, 기존의 최소자승법을 사용한 결과 보정 후에도 약 3~5 pixel의 오차가 남아 있지만, 제안한 방법으로 교정한 결과 최대 오차가 1화소 이하로 줄어들었다. 또한 그림 8에서 볼 수 있는 바와 같이 오차의 크기가 화면상의 위치와 상관 관계가 거의 없으므로 정확한 위치보정이 되었음을 알 수 있다.

IV. 카메라 감마(gamma)의 측정

1. 감마의 측정 방법

일반적으로 디스플레이 장치에서 출력되는 광량은 인가된 전압에 대하여 선형적으로 증가하지 않는다. 입력 전압과 출력되는 밝기를 로그-로그 스케일(logarithmic scale)로 그래프를 그려보았을 때의 기울기 (slope)를 디스플레이의 감마라고 부른다. 그리고 이 감마 인자 (factor)는 대조 (contrast)를 증가 혹은 감소시키기 위한 수치적인 (numerical) 인자로 사용된다^(10,11).

$$Output = A \cdot Input^\gamma$$

$$\log Output = \gamma \cdot \log Input + \gamma \cdot \log A \tag{7}$$

본 논문에서는 TMA 검사 장비의 감마를 측정하여 카메라에 입력되어 측정된 밝기에 밝기 보정하기 위한 인자로 사용하였다.

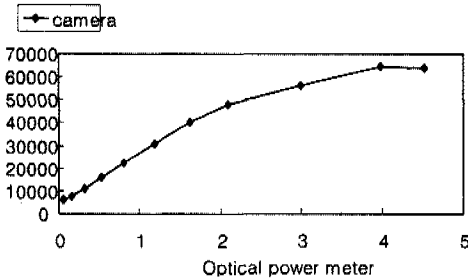
감마 측정용 영상으로 좌측에서 우측으로 가면서 밝아지는 계단형 시험영상을 사용하였다. 암실에서 이 영상의 각 지점의 밝기를 optical power meter로 측정한다. 그리고 카메라 출력의 평균 측정값을 구하여 입력의 크기와 측정값과의 관계를 나타내는 감마를 최소자승법 (Minimum Mean Square Error)에 의해 계산한다.

두 번째로 카메라의 광 stop size (조리개) 를 2배 씩 차례로 변화시키면서 카메라에 입력된 균일한 영상 (White 영상) 을 calibration sample로 삼고, 각각의 평균 밝기를 측정하였다. 영상의 밝기는 입력에 비례하여 선형적으로 변하므로 카메라의 감마를 계산할 수 있다.

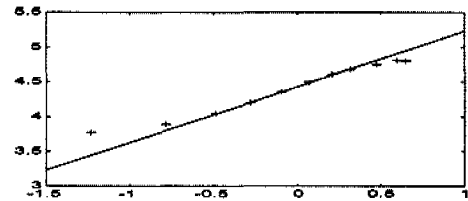
2. 감마 계산 결과

그림 9의 (a) 에서는 계단형 시험 영상을 optical power meter로 측정된 밝기와 카메라의 출력 사이의 비선형성을 볼 수 있다. 그림 9의 (b)에서 이를

로그-로그 그래프로 나타낸 것이다. 여기에서 밝기의 로그값이 약 -0.5에서 +0.5의 범위에서 기울기가 카메라의 감마 값이 된다. 여기에서 구한 값은 약 0.8이 된다. 여기에서 카메라 출력은 약 10배의 범위에서 감마를 사용한 모델이 적용되는 것을 알 수 있다. 입력 계단과 영상의 감마 참값 ($\gamma = 2.2$)을 알고 있으므로 계산된 감마 값에 포함된 측정치의 오차를 줄일 수 있다. 이를 이용해서 카메라의 감마를 보정한 결과 카메라의 감마는 0.72로 계산되었다.



(a) 광량과 카메라 출력의 비선형 관계

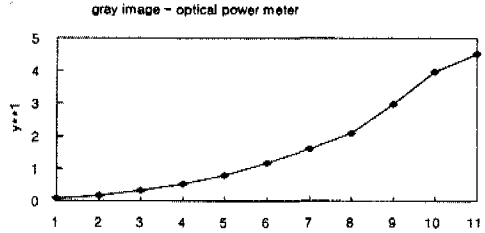


(b) 카메라 입력의 밝기와 출력 전압의 log-log plot. 직선의 기울기가 카메라의 gamma를 나타낸다.

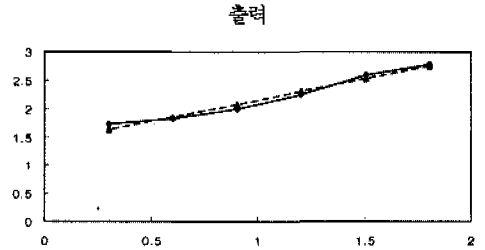
그림 9. 계단 영상을 사용한 감마의 측정

카메라의 조리개를 변경하면서 감마를 계산하는 두 번째 방법을 적용한 결과가 그림 10에 나와 있다. 그림 10의 (a)에서 균일한 밝기의 일정한 영상을 사용하고 카메라의 광 stop size를 6단계로 변화시켜가면서 측정한 결과를 보이고 있다. 입력 (input) 크기와 평균 밝기 사이의 그래프가 비선형으로 나타나므로 감마 인자를 가짐을 알 수 있다 (그림 10의 (a)). 이를 관계를 로그-로그 스케일로 나타낸 그래프는 그림 10의 (b)와 같고, 이 그래프의 기울기가 카메라의 감마 (γ)이며, 최소자승법에 의해 0.74로 계산되었다. 이와 같이 TMA 검사 시스템에서 두 가지의 calibration sample을 이용하여 카메라의 감마를 측정하였다. Gray Level 영상의 경우 카메라의 감마는 0.72로 계산되었고, White 영상에서는 0.74로 계산되었다. 그러므로 현재의 검사 시스

템에서 사용되는 카메라로 밝기보정을 할 경우, 감마 보정이 필요함을 알 수 있다.



(a) 광 stop size를 변화시키면서 측정한 카메라



(b) 광카메라 조리개를 변화시키며 측정한 밝기를 로그-로그 스케일로 나타낸 그림. 파선의 기울기가 측정된 감마를 나타낸다.

그림 10. White 영상에서 측정된 밝기와 카메라 출력의 관계 그래프

V. Noise 측정

1. Noise 측정 방법

CCD 카메라에 입력된 영상은 random noise의 영향을 받는다. 그러므로 이 noise를 gaussian noise로 가정하고 noise의 variance를 계산하여, TMA 검사 시스템의 밝기 측정 오차를 계산한다.

noise를 측정하기 위해 광 stop의 size를 변화시켜가면서 얻은 5개의 영상을 사용하여 밝기에 따른 noise의 variance값을 측정하였다. 입력 신호와 noise와의 관계를 구하기 위해서 fast parallel 알고리즘^[12]을 사용하여 각각의 영상에서 신호 성분 (signal component)과 잡음 성분 (noise component)을 구분하고 noise의 variance를 측정하였다.

2. Noise 측정 결과

noise variance를 측정한 후, 영상의 평균 밝기와 noise variance의 관계를 식 8로 표현하고 매개변수를 계산하였다. I는 영상의 평균 밝기이며, V는 noise의 variance이다.

$$V = A \cdot I + B \quad (8)$$

최소자승법에 의해 오차를 최소로 하는 매개변수 (A, B)는 $A=0.0128$, $B=1.1480$ 로 계산되었다. 그러므로 이 검사 시스템에서의 random noise는 밝기에 비례하여 증가하며, 밝기 오차는 1.3%임을 알 수 있다.

noise의 variance는 영상의 밝기에 비례하는 값으로 나타나므로 밝기 오차는 식 9와 같이 표현된다. 여기서 I는 영상의 밝기이고 ΔI 는 noise의 표준 편차, E는 noise로 인한 밝기 오차를 나타낸다. 그러므로 우리는 이 시스템의 밝기 메이터에 할당되는 적정 비트(bit) 수를 결정할 수 있다. White 영상을 이용해서 계산된 밝기 오차 (E)는 0.013이므로, 아래의 식에 의하여 이 시스템의 적정 비트 수는 7 비트로 계산된다

$$E = \frac{\Delta I}{I}, \quad 2^{-n} < E, \quad n = \lceil -\log_2 E \rceil \quad (9)$$

VI. 결 론

TMA의 각 화소에 해당되는 mirror의 불균일성을 광학적으로 측정하기 위한 장치로서 CCD 카메라와 이에 필요한 광학계로 구성된 시스템을 제안하였다. 이 검사장비에서 발생하는 기하학적 왜곡을 줄이기 위하여 본 논문에서 제안한 비선형 최적화 기법이 기존의 최소 자승법보다 약 4배 이상 우수하고, 잔류오차를 하나의 화소 이하로 줄일 수 있음을 확인하였다. 또한 광량과 카메라 사이의 비직선성을 측정하고 교정하는 방법을 구현하였다. 본 연구는 위치와 밝기를 동시에 측정하는 장비에 필수적인 위치 보정, 밝기 보정, 잡음 측정의 실제적인 방법을 제시하였으므로 TMA 외에도 CRT, TFT 등의 다른 디스플레이 장치의 광학적 측정 또는 조정 장치에 널리 적용될 수 있다.

수십만 개의 thin-film micromirror의 고유각들을 기계적인 방법으로 직접 측정하는 하는 것은 거의 불가능하기 때문에 영상 인식에서 사용되는 shape from shading 기법들을 응용하여, 각 mirror의 각도를 측정하는 방법 연구 등을 추후 과제로 들 수 있다.

참 고 문 헌

[1] 신형재, 고병천, 삼성전자 기술총괄 기반기술센

타, "MEMS 기술을 이용한 고화질 투사형 대형 화면 표시장치", *전자공학회지*, Vol.21, No.10, pp. 1225-1231, 1997.10

[2] 박원정, 김한성, 박준석, 허득현, 김동윤, 박원식, "PDP-TV (Plasma Display Panel) Technology review, 대우전자기술, No.3, pp.6-21, 1996.11.

[3] 이근우, 이기순, 우성재, "AMA pixel 보정 회로," *Technology review*, 대우전자기술, No.3, pp.78-88, 1996.11.

[4] Sang-Gook Kim, Kyu-Ho Hwang, Jin Hwang, Myung-Kwon Koo, Geun-Woo Lee, "Thin-film Micromirror Aray (TMA)- A New Chip-based Display Device for the Large Screen Display," *Proceedings of SPIE, Projection Display V*, Vol. 3634, San Jose, USA, January 1999.

[5] Juyang Weng, Paul Cohen, Marc Herniou, "Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. Vol.14, No.10, pp.965-977, October 1992.

[6] Fedrico Pedersini, Augusto Sarto Sarti and Stefano Tubaro, "Estomation and Compensation of Subpixel Edge Localization Error", *IEEE Transactions on Pattern Analasis and Machine Intellegence*, Vol. 19, No.11, pp.1278-1284, November 1997.

[7] Roger. Y. Tsai, "A versatile camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Methology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lens," *IEEE Journal of Robotics and Automation*. Vol. RA-3. No.4, pp.323-344, August 1987.

[8] W. H .Press, S. A . Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery, *Numerical recipies in C, 2nd ed*. Cambridge Univ. Press, New York, pp. 681-688, 1992.

[9] Mengsiang Li and Jean-Marc Lavest, "Some Aspects of Zoom lens Cmera Calibration," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. vol.18, No.11, pp.1105-1110, November 1996.

[10] Keith Jack, *Video Demystified : A Handbook for the Digital Engineer*, Second Edition, HighText, pp.58-61.

- [11] H.John Durrett, *Color and the Computer*, Academic Press,INC, pp.2-4.
- [12] Peter Meer, Jean-Michel Jolion and Azriel Rosenfield, "A Fast Parellel Algorithm for Blind Estimation of Noise Variance", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.12, No.2, pp.216-224, Feb. 1990.

이 은 숙(Eun-sook Lee)

정회원



1993년 2월 : 이화여자대학교

물리학과 졸업

1998년 2월 : 이화여자대학교

정보과학대학원 정보통신

학과 석사

이 별 옥 (Byung-uk Lee)

정회원

이화여자대학교 전자공학과 부교수

한국통신학회 논문지 제 22권 제 6호 참조