한국기계가공학회지, 제21권, 제3호, pp. 100～109(2022.03) ISSN 1598-6721(Print)
Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 21, No. 3, pp. 100~109(2022.03) ISSN 2288-0771(Online)

https://doi.org/10.14775/ksmpe.2022.21.03.100

# 대형 평판 디스플레이의 정밀 정렬을 위한 캘리브레이션 기술

홍준호*, 신동원**,#

*금오공과대학교 기계공학과 대학원, **금오공과대학교 기계시스템공학과

# Calibration Technology for Precise Alignment of Large Flat Panel Displays

Jun-Ho Hong*, Dongwon Shin**,#

*Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Kumoh National Institute of Technology,
**Department of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology.

(Received 27 October 2021; received in revised form 11 December 2021; accepted 5 January 2022)

## ABSTRACT

In this study, calibration technology that increases the alignment accuracy in large flexible flat panels was studied. For precise of calibration, a systematization of the calibration algorithm was established, and a calibration correction technique was studied to revise calibration errors. A coordinate systems of camera and UVW stage was established to get the global position of the mark, and equations for translational and rotational calibration were systematically derived based on geometrical analysis. Correction process for the calibration data was carried, and alignment experiments were performed sequentially in cases of the presence or absence of calibration-correction. Alignment results of both calibration correction and non-calibration correction showed accuracy performance less than 1μm. On the other hand, the standard deviation in calibration-correction is smaller than non-calibration correction. Therefore, calibration correction showed improvement of the alignment repeatability.

**Keywords :** Lage Flat Panel Display(대형평판 디스플레이), Camera(카메라), Mark(마크), Alignment(정렬), Calibration(캘리브레이션), Calibration Correction(캘리브레이션 보정)

## 1. 서 론

디스플레이란 전자기기로부터 출력되는 전기신호를 화상 정보로 나타내어 다양한 정보를 인간이 시각적으로 볼 수 있도록 화면으로 구현해 주는 영상 표시장치를 의미한다. 디스플레이 산업은 1950년대 브라운관 TV 보급과 함께 본격적으로 성장하였으며, 1990~2000년대 평판 디스플레이의 전환을 거쳐 현재는 차세대 디스플레이로의 전환이 나타나고 있다. 평판 디스플레이는 LCD, PDP를 지나 현재는 차세대 디스플레이로 OLED, 마이크로LED 패널이 주목받고 있다[1,2].

평판 디스플레이의 핵심은 패널이라 할 수 있으며, 패널의 품질은 TV 및 휴대폰 등의 완제품 경쟁력에 큰 영향을 미치며, 패널 품질을 위해서는 제

# Corresponding Author : shindw@kumoh.ac.kr
Tel: +82-54-478-7321, Fax: +82-54-478-7319

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

조공정의 성능이 중요하다[3,4]. 이러한 제조에서 핵심기술중의 하나가 평판의 정렬기술이다. 특히 최근에는 평판 디스플레이 패널의 크기가 대형화하고 픽셀사이즈는 소형화하면서 정렬기술의 높은 정밀도가 요구되고 있다[5,6,7].

특히, 평판 디스플레이로 각광받는 OLED는 제조공정이 기존의 LCD에 비하여 까다롭고[8,9], 패널의 유연성으로 인하여 정렬의 난이도가 높은 영역에 해당한다[10].

OLED의 구조는 아래부터, 하판(Backplane), OLED 화소, 봉지(Encapsulation) 기판, 구동회로로 구성되어 있다. 하판은 기판 위에 여러 물질이 층을 이루어 TFT(Thin File Transistor)를 구성하고, TFT는 OLED 화소마다 전원을 On/Off 하고 전류를 공급 및 조절하여 밝기를 제어한다.

대형 OLED 기판의 OLED 소자가 오염이 되지 않도록 밀봉하는 봉지공정이 매우 중요하며 봉지 방식 중에서 대표적인 열가압 합착공정은 증착기판(하판)과 봉지기판(상판) 간의 정렬오차를 측정하고 보정하는 정밀 정렬과정이 합착공정의 품질을 좌우한다고 볼 수 있다. 이에 본 연구에서는 이러한 합착공정 중의 정렬기술에 대한 연구를 진행하였다.

이러한 정렬기술은 평판 디스플레이 뿐 아니라, PCB 장비, BGA 장비, 반도체 장비 등에 활용되었고, 이에 대한 기존 연구로, 머신비전을 이용하여 기판간의 정렬오차를 계산하고 xy$\theta$ 스테이지를 이용하여 정렬하여 PCB의 스크린프린터에 적용한 연구가 진행되었다[11].

평판디스플레이의 정렬장치에 대하여 영상처리 알고리즘과 정렬스테이지의 기계적 특성에 대한 연구가 진행되었다[5,6]. BGA 노광장비에 정렬오차를 계산하는 방법으로 중심정렬 대신 마크정렬을 도입하여 정렬오차를 개선한 연구도 진행되었다 [7].

기존의 정렬기술 연구는 중소형의 PCB, LCD 기판에는 양호한 결과를 보여주지만, 대형 디스플레이에 대한 카메라 Calibration과 Calibration 보정을 제시하고 있지 않다. 측정 카메라의 Calibration과 Calibration 보정이 없이 OLED와 같이 유연성이 있는 대형의 OLED 패널에서는 마크의 측정오차가 많이 발생할 수 있고, 이는 제품불량의 원인이 된다.

이에 본 연구에서는 유연성이 있는 대형의 OLED 패널에서도 측정의 정밀도를 높이는 Calibration 기술에 대하여 연구하였다. 이를 위하여 Calibration의 정밀도를 높이고자 Calibration 알고리즘의 체계화를 구축하고, Calibration 오차를 보정하는 Calibration 보정에 대하여 연구하였다.

본 논문에서는 2장에서는 비전 정렬장비(Vision Aligner)의 구성요소, 3장에서는 마크의 위치를 측정하기 위한 좌표계 설정에 대하여 설명한다. 4장에서는 Calibration 알고리즘, 5장에서는 Calibration 보정 알고리즘에 대하여 설명한다. 6장에서는 실험결과에 대하여 설명하고, 7장에서는 결론에 대하여 언급한다.

## 2. Vision Aligner의 구성요소

Vision Aligner 은 Fig. 1과 같이 OLED 제조장비의 핵심공정 시스템으로, 공급된 상판은 Color Filter Glass이고 하판은 TFT Glass로, 상판의 4개의 마크와 하판의 4개의 마크를 검출하고 상, 하판 간의 틀어진 오차를 연산한 후에 하판 UVW 스테이지를 구동하여 하판 마크를 움직여 상판 마크에 일치시킨다. 즉, 대상(Object)인 하판을 기준(Reference)인 상판에 맞추게 한다.

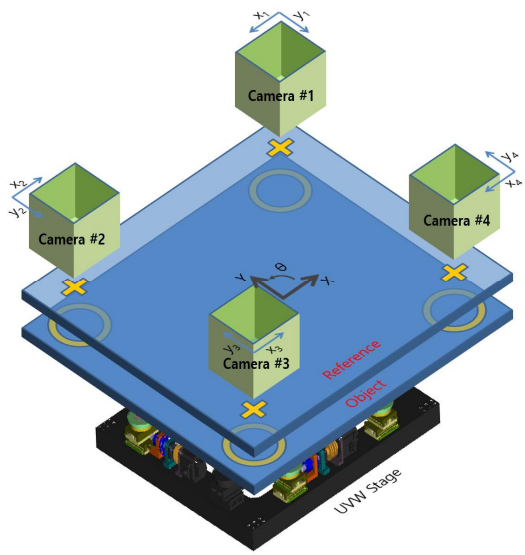


**Fig. 1 Layout of vision aligner**

Fig. 1의 각 구성요소에 대하여 설명하면, 다음과 같다.

- Camera: 상판과 하판의 마크 영상을 획득하는 카메라는 패널의 네 모서리 상에 위치한 카메라 4대이고, 카메라 번호는 1번부터 4번까지 시계반대방향으로 매긴다. 이러한 카메라좌표계를 2차원 평면에서 도시하면 Fig. 2와 같다. 카메라의 화면의 해상도는 640*480이다. 카메라의 FOV(Field of View)는 3.2*2.4mm이고, 이때 픽셀분해능은 5 $\mu$ m/pixel이다. 카메라는 Camera Stage 상에서 이송되며 원하는 곳에 영상을 위치시킨다.
- UVW Stage: 영상처리를 통하여 구한 정렬오차만큼 하판을 이송하여 정렬을 수행하는 스테이지로 x1, x2, y1, y2의 4축으로 구동하여 x, y, $\theta$ 의 운동을 구현한다

카메라 영상 획득 및 UVW 스테이지의 정렬제어를 수행하는 주제어기는 PC이고, PC 내부에 정렬마크의 영상을 획득하는 Frame Grabber와 정렬오차에 대한 모션제어를 담당하는 Motion Controller를 포함한다.

## 3. 좌표계

Vision Aligner의 전체 Process는 Calibration 과정 Align 과정의 순서대로 진행된다. 즉, 카메라 좌표계와 UVW 스테이지 좌표계 간의 관계를 알아내는 Calibration이 먼저 수행된 후에, 카메라로 상하판의 마크위치를 측정하고, 이를 바탕으로 정렬오차를 측정하고, 마지막으로 UVW 스테이지로 정렬오차 보정을 하게 된다.

Vision Aligner는 상판과 하판 간의 정렬오차를 보정할 때, 상판 글라스는 진공흡착기에 고정된 상태이므로 상판 마크는 기준 마크(Reference Mark)가 되고, 하판 글라스는 UVW 스테이지에 의하여 움직이므로 하판 마크는 대상 마크(Object Mark)가 된다.

Fig. 1과 같이 Visual Aligner에는 카메라 좌표계와 UVW 스테이지 좌표계가 있는데, 전역 좌표계(Global Frame)는 UVW 스테이지 좌표계 $\{X, Y\}$가 되므로, 카메라 좌표계 $\{x_i, y_i\}$에서 측정한 마크의 위치는 전역좌표계로 표현되어야 한다. 이를 위해

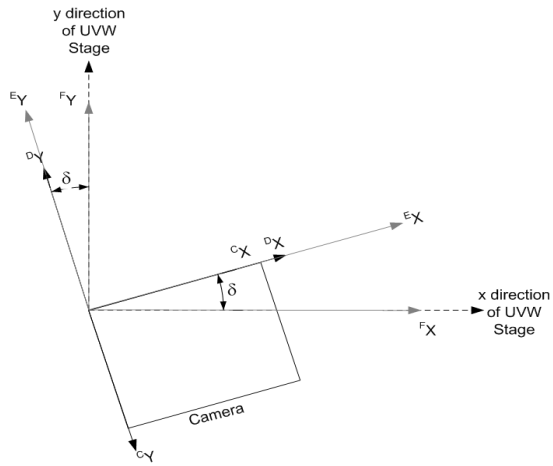


**Fig. 2 Camera frame C and transformed frame D, E, and F**

서는 카메라 좌표계가 전역좌표계에 대하여 얼마만큼 떨어져 있고 회전되어 있는가에 대한 정보가 있어야 한다. 이러한 작업을 카메라 Calibration이라고 한다. 카메라 Calibration은 UVW 스테이지를 x, y, $\theta$로 일정량을 움직이고 이에 따른 하판 마크의 위치를 측정하고 기하학적 관계식을 이용하여 구할 수 있다. Calibration 이후에는 어떠한 카메라에서 획득한 마크의 위치도 전역좌표계로 변환되어 이후의 정렬오차를 측정하고 정렬오차를 통하여 상판과 하판의 정렬을 수행한다.

### 3.1 Camera 좌표계와 좌표변환

카메라 좌표 $\{{}^{C}X, {}^{C}Y\}$는 Fig. 2와 같이 상단 좌측에 원점이 있고 카메라 방향이 UVW 스테이지의 방향 $\{{}^{F}X, {}^{F}Y\}$과 일치하지 않는다. 이에 모든 카메라 좌표계의 방향이 UVW 스테이지의 방향과 일치하도록 하고 단위도 mm로 일치하도록 변환해주어야 한다. 즉, 다음과 같이 C 좌표계로부터 F 좌표계로 변환한다.

$$\{{}^{C}X, {}^{C}Y\} \rightarrow \{{}^{D}X, {}^{D}Y\} \rightarrow \{{}^{E}X, {}^{E}Y\} \rightarrow \{{}^{F}X, {}^{F}Y\}$$

- $\{{}^{C}X, {}^{C}Y\}$: Camera 의 좌표계로 실제 카메라좌표계, 단위는 픽셀

- $\{^{D}X,^{D}Y\}$: Flipped Camera 의 좌표계로 $\{^{C}X,^{C}Y\}$를 $\{^{F}X,^{F}Y\}$방향으로 Flip함, 단위는 픽셀
- $\{^{E}X,^{E}Y\}$: Flipped Factored Camera 의 좌표계로 $\{^{D}X,^{D}Y\}$에 mm/pixel을 곱하여 단위를 mm로 전환함, 단위는 mm
- $\{^{F}X,^{F}Y\}$: Flipped Factored Rotated Camera 의 좌표계로 UVW 스테이지의 방향과 동일. $\{^{E}X,^{E}Y\}$를 $\delta$만큼 회전함. 단위는 mm
- $\delta$: C, D, E 좌표계가 F 좌표계에 대하여 회전한 각도, 단위는 degree

이러한 C 좌표계로부터 F 좌표계로 변환하기 위한 변환행렬의 값은 카메라 Calibration을 통하여 구할 수 있다.

### 3.2 전역좌표계(Global Frame)

FIg. 3의 상부는 기준 상판의 각 마크의 위치 $^{F}R_i$와 이들이 전역좌표값 $^{G}R_i$을 보여주고 있다. FIg. 3 의 하부는 대상 하판의 각 마크의 위치 $^{F}O_i$와 이들이 전역좌표값 $^{G}O_i$을 보여주고 있다. 여기서, 전역좌표계 G, $\{^{G}X,^{G}Y\}$는 UVW 스테이지 좌표계로, 원점은 홈위치에서의 UVW 스테이지의 중심 $C_H$이다.

- $\{^{G}X,^{G}Y\}$: Global 좌표계
- $^{F}R_i$: F frame에서의 Reference Mark의 위치
- $^{F}O_i$: F frame에서의 Object Mark의 위치
- $^{G}R_i$: G frame에서의 Reference Mark의 위치
- $^{G}O_i$: G frame에서의 Object Mark의 위치
- $C_H$: 홈에서의 UVW 스테이지의 중심

## 4. Calibration 알고리즘

Calibration은 카메라 좌표계의 분해능(픽셀당 거리)과 전역좌표계에 대한 플립(뒤집어짐), 회전각도, 원점의 위치를 알아내는 과정이다.

이러한 카메라 Calibration은 Fig. 4와 같은 과정으로 진행된다. 카메라 #1을 보면 1-6번까지의 순서대로

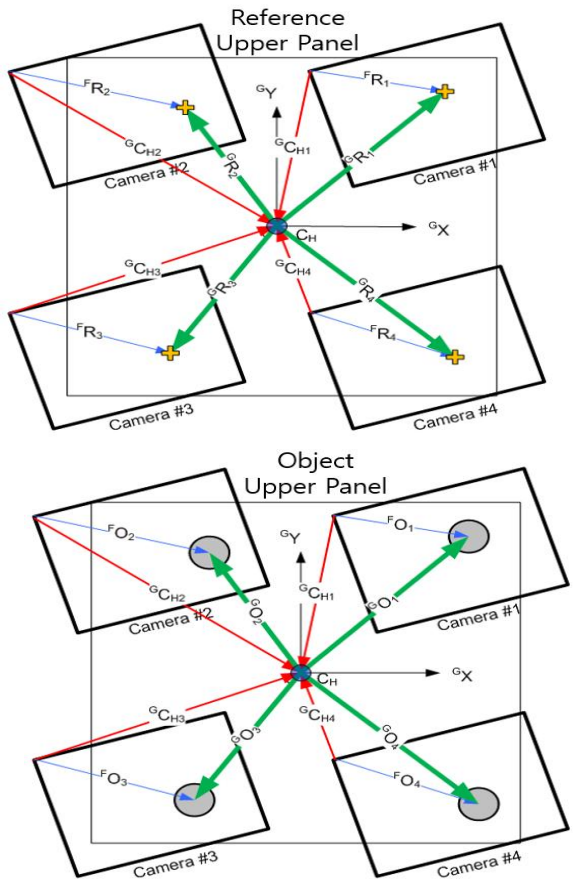


**Fig. 3 Mark coordinates of upper and lower panel in global Frame**

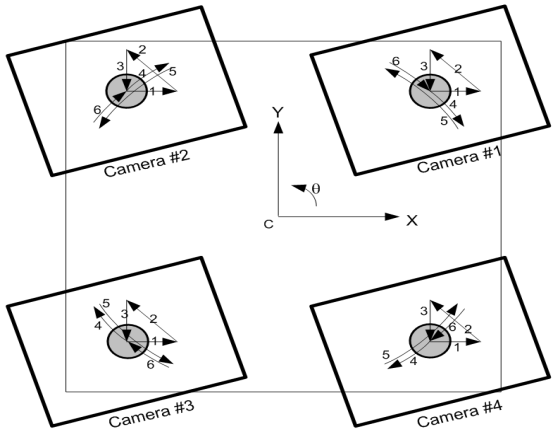


**Fig. 4 Camera calibration process**

UVW 스테이지가 움직임에 따라 마크가 움직이며 Calibration이 진행된다. 1~3번은 병진 Calibration이고, 4~6번은 회전 Calibration이다.

병진 Calibration은 UVW스테이지를 X 방향(1번), Y 방향(2번), 복귀(3번)으로 움직임으로써 각각의 위치에서 마크의 위치를 측정하여, 카메라의 픽셀당 거리, 플립, 회전각도를 구한다.

회전 Calibration은 UVW 스테이지를 $+\theta$ 방향(4번), $+\theta$ 방향(5번), 복귀(6번)으로 움직임으로써 각각의 위치에서 마크의 위치를 측정하여, UVW 스테이지 좌표계에 대한 카메라 좌표계의 원점 위치를 알아내는 과정이다.

이러한 Calibration이 각 카메라 별로 진행되어 그림과 같이 카메라 1번부터 4번까지의 순서대로 하판 마크를 움직이며 Calibration이 진행된다.

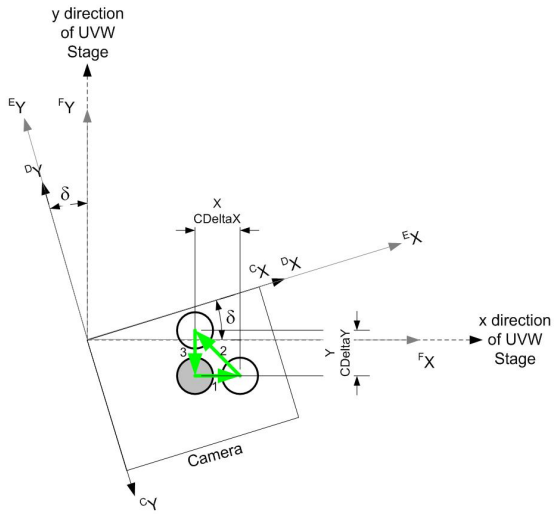


**Fig. 6 Translational calibration**

## 4.1 병진 Calibration

카메라의 픽셀 당 거리, 플립, 회전각도를 구하기 위하여, Fig. 5와 같이 C좌표계로부터 F좌표계로 변환하기 위한 변환행렬을 정의하고 이로부터 카메라 병진 Calibration 파라미터들을 구한다.

C→D는 C좌표계를 F좌표계와 동일한 방향이 되도록 좌표계를 Flip 하는 것이고, D→E는 픽셀단위에서 mm 단위로 변환하는 것이고, E→F는 F좌표계와 동일한 방향으로 회전변환하는 것이다. 여기서, F 좌표계의 방향은 G 좌표계와 동일하지만 F좌표계의 원점은 카메라의 좌상단이고 G 좌표계의 원점은 UVW 스테이지의 회전중심이다.

C 좌표계로부터 F 좌표계로 변환하는 변환행렬을 도시하면 Fig. 5와 같다. $T_{DC}$는 C에서 D로 변환하는 행렬이고, $T_{ED}$는 D에서 E로 변환하는 행렬로서 $C_x$, $C_y$는 x, y축의 픽셀당 거리이며, $T_{FE}$는 E

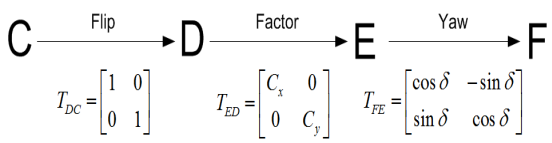


**Fig. 5 Transformation matrix between coordinate systems**

에서 F로 변환하는 행렬로서 $\delta$는 F좌표계가 G좌표계에 대하여 회전한 각도이다.

최종적으로 C 좌표를 F 좌표로 변환하는 행렬은 $T_{FC} = T_{FE}T_{ED}T_{DC}$과 같이 구할 수 있다.

### 4.1.1 C 좌표계 → D 좌표계

우선 C 좌표계로부터 D 좌표계로 바꾸는 변환행렬을 구하는 과정을 기술한다.

Fig. 6과 같이 가운데 마크(회색)를 중심으로 UVW 스테이지를 이용하여 ${}^{F}X$방향으로 CDeltaX만큼 움직이거나 (Fig. 6의 1번), ${}^{F}Y$방향으로 CDeltaY만큼 움직일 때 (Fig. 6의 2번) C 좌표값을 다음과 같이 측정한다.

- X 만을 움직일 경우 CDeltaX = $\left[{}^{C}X_1, {}^{C}Y_1\right]^T$ 을 측정한다. (아래첨자 1은 X만 움직였음을 의미)
- Y 만을 움직일 경우 CDeltaY = $\left[{}^{C}X_2, {}^{C}Y_2\right]^T$ 을 측정한다. (아래첨자 2는 Y만 움직였음을 의미)

이를 통하여 C 좌표값 $\left[{}^{C}X_i, {}^{C}Y_i\right]^T$로부터 D 좌표값 $\left[{}^{D}X_i, {}^{D}Y_i\right]^T$로 바꾸는 2*2 변환행렬 $T_{DC}$를 쉽게 구할 수 있다. C에서 D로 가는 변환은 좌표계를 뒤집듯이 바뀌는 것이므로 D 좌표계를 Flipped Camera 좌표계라 칭한다.

### 4.1.2 D좌표계→E좌표계→F좌표계

E 좌표(픽셀단위)를 F 좌표(mm단위)로 변환하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix}\cos\delta & -\sin\delta\\ \sin\delta & \cos\delta\end{bmatrix}\begin{bmatrix}{}^{E}X\\ {}^{E}Y\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}{}^{F}X\\ {}^{F}Y\end{bmatrix} \tag{1}$$

위 식에서 E 좌표를 D 좌표로 바꾸어 대입하면 아래와 같다. 여기서 $C_x$는 카메라의 x 방향 해상도, $C_y$는 카메라의 y방향 해상도로 단위는 [mm/pixel]이다.

$$\begin{bmatrix}\cos\delta & -\sin\delta\\ \sin\delta & \cos\delta\end{bmatrix}\begin{bmatrix}C_x{}^{D}X\\ C_y{}^{D}Y\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}{}^{F}X\\ {}^{F}Y\end{bmatrix} \tag{2}$$

이를 x, y 값으로 풀면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\cos\delta C_x{}^{D}X-\sin\delta C_y{}^{D}Y&={}^{F}X\\ \sin\delta C_x{}^{D}X+\cos\delta C_y{}^{D}Y&={}^{F}Y\end{aligned} \tag{3}$$

여기에서 미지수는 $C_x$, $C_y$, $\delta$이므로 이를 아래와 같은 방법으로 구한다.

1. 하판 스테이지로 ${}^{F}X$방향으로 X만을 움직이면, ${}^{F}X$=X, ${}^{F}Y$=0가 되고, 이 때 마크의 위치 $\left[{}^{C}X_1, {}^{C}Y_1\right]^T$ 을 측정하고 여기에 $T_{DC}$ 를 곱하여 $\left[{}^{D}X_1, {}^{D}Y_1\right]^T$를 구한다. 이 값들을 위의 식에 대입하면 아래와 같다.

$$\cos\delta C_x{}^{D}X_1-\sin\delta C_y{}^{D}Y_1={}^{F}X \tag{4}$$

$$\sin\delta C_x{}^{D}X+\cos\delta C_y{}^{D}Y=0 \tag{5}$$

2. 하판 스테이지로 ${}^{F}Y$방향으로 Y만을 움직이면, ${}^{F}X$=0, ${}^{F}Y$=Y가 되고, 이때 마크의 위치 $\left[{}^{C}X_2, {}^{C}Y_2\right]^T$ 을 측정하고 여기에 $T_{DC}$ 를 곱하여 $\left[{}^{D}X_2, {}^{D}Y_2\right]^T$를 구한다. 이 값들을 위의 식에 대입하면 아래와 같다.

$$\cos\delta C_x{}^{D}X_2-\sin\delta C_y{}^{D}Y_2=0 \tag{6}$$

$$\sin\delta C_x{}^{D}X_2+\cos\delta C_y{}^{D}Y_2=Y \tag{7}$$

식(5), 식(6)를 정리하면, 다음과 같다.

$$\tan\delta=-\frac{{}^{D}Y_1C_y}{{}^{D}X_1C_x},\ \tan\delta=-\frac{{}^{D}X_2C_x}{{}^{D}Y_2C_y} \tag{8}$$

이로부터, $\alpha$를 다음과 같이 구한다.

$$\alpha=\frac{C_y}{C_x}=\sqrt{\left|\frac{{}^{D}X_1}{{}^{D}Y_1}\frac{{}^{D}X_2}{{}^{D}Y_2}\right|} \tag{9}$$

$\alpha$를 식(8)에 대입하면 아래와 같이 $\delta$를 구할 수 있고, 실제 $\delta$는 두 개의 평균값으로 취한다.

$$\delta=\tan^{-1}\left(-\frac{{}^{D}Y_1\alpha}{{}^{D}X_1}\right),\ \delta=\tan^{-1}\left(-\frac{{}^{D}X_2}{{}^{D}Y_2\alpha}\right) \tag{10}$$

이렇게 구한 $\alpha$, $\delta$ 값을 식(4), 식(7)에 대입하면 아래와 같다.

$$C_x=\frac{X}{\cos\delta{}^{D}X_1-\sin\delta{}^{D}Y_1\alpha} \tag{11}$$

$$C_y=\frac{X}{\sin\delta{}^{D}X_2/\alpha-\cos\delta{}^{D}Y_2} \tag{12}$$

## 4.2 회전 Calibration

앞 절에서 병진 Calibration을 통하여 카메라의 분해능, 플립, 회전각도를 구했어도 이는 카메라 좌표계 자체의 특징이고, 전역좌표계에 대한 위치관계는 모르는 상태이다. 즉, Fig. 4의 카메라의 원점에서 UVW 스테이지 중심까지의 벡터 ${}^{G}C_{H_i}$ 를 알아야, 마크의 카메라 좌표값으로부터 전역 좌표값을 알 수 있게 된다.

Fig. 7에서와 같이, 현재 마크의 위치를 원점으로 UVW 스테이지 (XY 좌표계)와 동일한 방향으로 R 좌표계 $\{{}^{R}X, {}^{R}Y\}$를 설정한다. R 좌표계에서 UVW 스테이지의 중심까지의 벡터가 ${}^{R}C$가 된다.

### 4.2.1 ${}^{R}C$를 구하는 과정

R 좌표계에서 마크의 중심위치를 ${}^{R}C$를 중심으로 회전한 좌표는 다음과 같다.

$$ {}^{R}P_{\theta} = Rot(\theta)(0 - {}^{R}C) + {}^{R}C = [1 - Rot(\theta)]\,{}^{R}C \quad (13) $$

이제 UVW 스테이지의 중심을 구하는 과정을 기술한다. 상기 그림과 같이 가운데 마크(회색)를 중심으로 UVW 스테이지를 이용하여 $-\theta$를 움직였을 때의 마크의 위치(Fig. 7의 6번) ${}^{R}P_{-\theta}$, $\theta$를 움직였을 때의 마크의 위치(Fig. 7의 4번) ${}^{R}P_{\theta}$는 식(13)을 이용하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$ {}^{R}P_{\theta} = [1 - Rot(\theta)]\,{}^{R}C \quad (14) $$

$$ {}^{R}P_{-\theta} = [1 - Rot(-\theta)]\,{}^{R}C \quad (15) $$

두 개의 변위를 빼면 다음과 같다.

$$ {}^{R}P_{\theta} - {}^{R}P_{-\theta} = [-Rot(\theta) + Rot(-\theta)]\,{}^{R}C \quad (16) $$

$$ = 2\begin{bmatrix} 0 & \sin\theta \\ -\sin\theta & 0 \end{bmatrix} {}^{R}C $$

여기서 두 개의 변위 값의 차이 ${}^{R}P_{\theta} - {}^{R}P_{-\theta}$는 카메라로부터 측정할 수 있고, 이로부터 ${}^{R}C$를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$ {}^{R}C = \frac{1}{2\sin^2\theta}\begin{bmatrix} 0 & -\sin\theta \\ \sin\theta & 0 \end{bmatrix}\left({}^{R}P_{\theta} - {}^{R}P_{-\theta}\right) \quad (17) $$

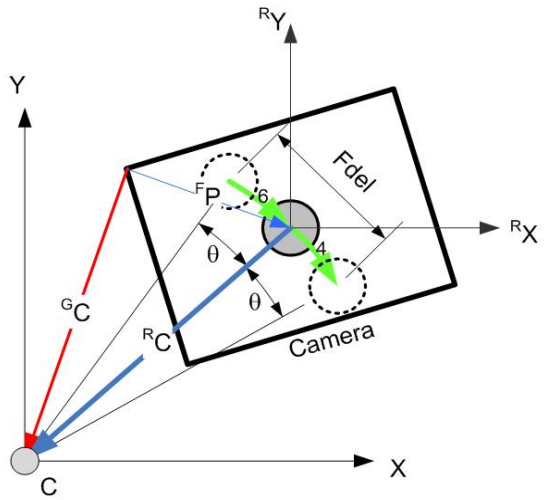


**Fig. 7 Rotational calibration**

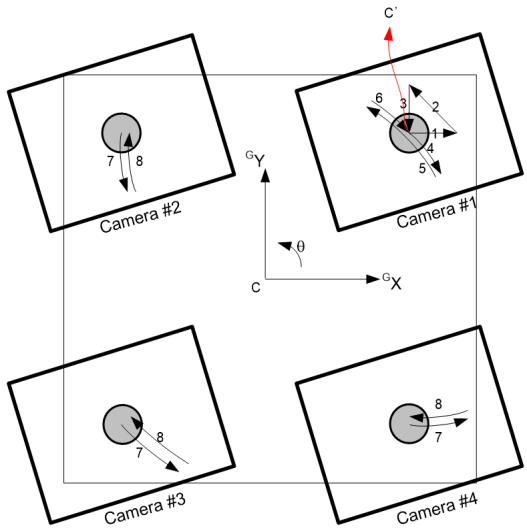


**Fig. 8 Pivoting about the mark of camera #1**

결국, Fig. 7의 카메라의 원점으로부터 UVW 스테이지의 중심까지의 벡터 ${}^{G}C$는 다음과 같다. 식(18)에서 ${}^{F}P$는 카메라에서 측정할 수 있다.

$$ {}^{G}C = {}^{R}C - {}^{F}P \quad (18) $$

병진 Calibration과 회전 Calibration이 완료되면 모든 카메라의 마크 위치를 Fig. 4와 같이 전역좌표계에서 구할 수 있다. 카메라 i (i=1,...,4)의 마크에 대한 전역좌표값 ${}^{G}P_{i}$은 다음과 같이, 카메라에서 측정한 ${}^{F}P_{i}$에서 ${}^{G}C_{i}$를 뺀 값이 된다.

$$ {}^{G}P_{i} = {}^{F}P_{i} - {}^{G}C_{i} \quad (19) $$

## 5. Calibration의 보정 알고리즘

병진 Calibration과 회전 Calibration을 행한 후에 카메라로 측정한 마크의 위치는 UVW 스테이지의 중심을 원점으로 한 전역좌표계로 변환할 수 있게 된다. 그러나 회전 Calibration을 통하여 구한 카메라의 원점에서 UVW 스테이지의 중심까지의 벡터 ${}^{G}C_{i}$가 정확한 값인가에 대하여는 검증 및 보정 과정을 거쳐야만 한다.

왜냐하면 대형 평판 디스플레이의 경우, ${}^{G}C_i$의 크기가 마크의 크기에 비하여 워낙 큰 값인 관계로, ${}^{G}C_i$ 값에 약간의 오차가 생기더라도 스테이지의 회전시 마크의 위치변화는 큰 영향을 받기 때문이다. 이에 회전 Calibration을 통해 구한 스테이지의 중심위치가 정확한지에 대하여 검증과 이의 보정이 필요하다.

Calibration 데이터를 기반으로 하여, Fig. 8과 같이 스테이지의 회전중심 C를 중심으로 카메라 #1의 마크를 $\theta$만큼 회전했을 때의 병진변위 $\Delta P$를 계산하고, 실제로 스테이지로 회전 $\theta$와 음의 $-\Delta P$ 병진변위를 동시에 가하면 카메라 #1의 마크는 움직이지 않고 제자리에 있게 된다. 반면 카메라 #2, #3, #4의 마크는 Fig. 8에서와 같이 카메라 #1의 마크를 중심으로 Pivoting하는 움직임을 보인다.

Fig. 8에서와 같이, 스테이지에 회전 $\theta$를 가함과 동시에 계산된 $-\Delta P$를 동시에 가하게 되면 카메라 #1의 마크는 C'의 위치에 그대로 있게 되고 나머지 카메라의 마크들은 C′를 중심으로 그림의 7번과 같이 회전하게 된다. 이어서 $-\theta$를 가함과 동시에 그에 해당하는 $+\Delta P$를 동시에 가하게 되면 카메라#1의 마크는 계속 C′의 위치에 있게 되고 나머지 카메라의 마크들은 C′를 중심으로 그림의 8번과 같이 회전하여 제자리도 돌아오게 된다. 이런 움직임을 Pivoting이라고 칭한다.

그러나 실제로 상기의 과정을 실행하면, 카메라 #1의 마크도 약간의 움직임이 발생하게 되는데, 이는 Calibration 데이터에 오차가 있기 때문이다. 이런 움직임을 측정하여 UVW 스테이지의 중심위치를 보정하는 작업을 수행하면 보다 정확한 Calibration 데이터를 얻을 수 있게 된다.

## 5.1 스테이지 중심의 보정

Fig. 9에서 카메라의 마크 P는 다음과 같고, 이후에 ${}^{G}C$를 간단히 $C$로 표기한다.

$$P = -{}^{G}C + {}^{F}P = C + {}^{F}P \tag{20}$$

카메라의 마크 $P$를 회전중심 C를 기준으로 $\theta$만큼 회전하면 Fig. 9와 같이 $P^{\theta}$ 가 된다. $P^{\theta}$와 $P$간의

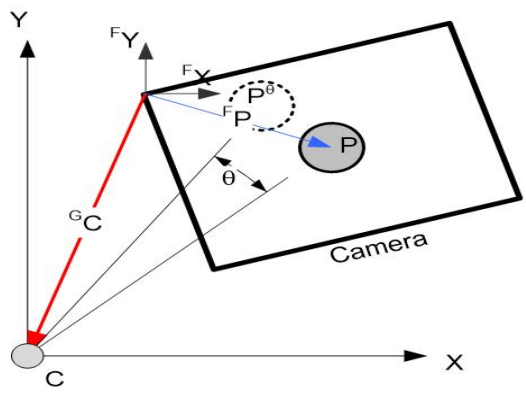


**Fig. 9** $P^{\theta}$ **after rotating** $P$ **by** $\theta$

차이를 $\Delta P$라고 하면 그 값은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\Delta P = P^{\theta} - P = Rot(\theta)P - P = (Rot(\theta) - I)P \tag{21}$$

$P$에 $\theta$의 회전변위를 가한 후에 $-\Delta P$의 병진변위를 가한 결과는 아래의 식과 같이 원래대로 $P$로 돌아오게 된다.

$$P' = P^{\theta} - \Delta P = Rot(\theta)P - (Rot(\theta) - I)P = P \tag{22}$$
$$where, P = -C + {}^{F}P$$

그러나, 실제로 회전 Calibration에서 구한 스테이지의 중심 C는 Calibration 알고리즘으로 추정하여 계산한 값일 뿐, 실제의 회전 중심과 차이가 있을 수 있다. 실제 회전 중심을 $C_A$라하고, $P$의 실제 위치를 $P_A$라 하면, 식(19)는 다음과 같이 바뀐다.

$$P_A = -C_A + {}^{F}P$$

이를 이용하여 카메라의 마크의 실제 위치 $P_A$를 실제 회전중심 $C_A$를 기준으로 $\theta$만큼 회전하고, 이어서 $-\Delta P$의 병진변위를 가한 결과는 다음과 같은 식이 된다.

$$P_A' = P_A^{\theta} - \Delta P = Rot(\theta)P_A - (Rot(\theta) - I)P \tag{23}$$
$$= Rot(\theta)(-C_A + C) - C + {}^{F}P$$

상기와 같이 구한 $P_A$와 $P_A^{'}$의 차이 $\delta$을 구하면 다음과 같다.

$$\delta = P_A^{'} - P_A = (Rot(\theta) - I)(C - C_A) \quad (24)$$

이로부터 $C_A$를 구하면 다음의 식과 같다.

$$C_A = C - (Rot(\theta) - I)^{-1}\delta \quad (25)$$

상기의 수식에서 C는 회전 Calibration에서 구한 값을 사용하고, R은 회전행렬이므로 $\theta$의 값으로부터 계산하고, $\delta$값은 $\theta$ 회전 전후의 카메라에서 측정한 값을 빼서 구한다.

실제 프로그램에서는 카메라 4대에 대하여, 순서대로 아래와 같은 식을 4회 실행함으로써 C값을 갱신해 나간다.

$$C = C - (Rot(\theta) - I)^{-1}\delta \quad (26)$$

## 6. 실험결과

알고리즘을 PC에서 구현하기 위하여 C++로 코딩을 수행하였다. 개발환경은 MS Visual C++이며, 영상처리를 위하여 Matrox의 하드웨어와 MIL을 사용하였으며, 모션구동을 위하여 Ajinextek의 모션제어기와 Motion Library를 사용하였다. Fig. 10은 카메라 상의 상하판의 마크의 영상을 보여주며, 십자모양은 상판 마크, 원모양은 하판 마크를 나타낸다.

본 연구에서 제안한 Calibration을 시행하고, Calibration 보정을 시행한 경우와 시행하지 않은 경우의 정렬을 50회 실행하여 이에 대하여 정렬오차의 평균을 계산하여 Table 1에 기술하였다.

Table 1에서 보는 바와 같이 Calibration 보정을 하였을 경우와 하지 않았을 경우 정렬오차가 모두 1$\mu$m 미만으로 나와 정렬성능은 모두 양호한 것으로 나타났다. 반면, 상하판의 마크간의 거리차이를 정렬 50회에 대하여 측정하여 이의 표준편차를 Table 2에 기술하였다. 여기서 $\Delta x_i$, $\Delta y_i$는 i 번째 카메라의 상하판 마크간의 x축, y축 거리차이이다.

Table 2에서와 같이, Calibration 보정을 하였을 경우에 표준편차가 더 작게 나오는 것을 알 수 있으며, 이는 정렬반복성을 좋게 하는 것임을 알 수 있다.

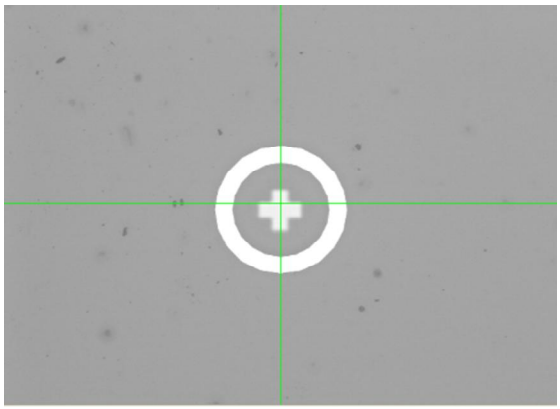

**Fig. 10 Marks of upper and lower panel**

**Table 1 Alingment error**

| Calibration Correction | X (μm) | Y (μm) | Θ (degree) | No. of Alignment |
|---|---|---|---|---|
| Yes | 0.0139 | -0.455 | -4.84e-7 | 50 |
| No | 0.0781 | 0.155 | 6.11e-6 | 50 |

**Table 2 Mark position error**

| Calibration Correction | σ (μm) | | | | | | | | No. of Alignment |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $\Delta x_1$ | $\Delta y_1$ | $\Delta x_2$ | $\Delta y_2$ | $\Delta x_3$ | $\Delta y_3$ | $\Delta x_4$ | $\Delta y_4$ | |
| Yes | 0.316 | 0.366 | 0.436 | 0.414 | 0.321 | 0.273 | 0.184 | 0.341 | 50 |
| No | 0.746 | 0.670 | 0.543 | 0.443 | 0.495 | 0.406 | 0.399 | 0.561 | 50 |

## 7. 결론

본 연구에서는 유연성이 있는 대형의 OLED 패널에서도 측정의 정밀도를 높이는 Calibration 기술에 대하여 연구하였다. 이를 위하여 Calibration의 정밀도를 높이고자 Calibration 알고리즘의 체계화를 구축하고, Calibration 오차를 보정하는 Calibration 보정기술에 대하여 연구하였다.

이를 위하여 마크의 위치를 측정하기 위한 좌표계 설정을 구축하였고, 이를 바탕으로 병진 Calibration, 회전 Calibration에 대한 수식을 체계적

으로 도출하였다. 구한 Calibration 데이터의 검증 및 보정 수식을 구축하고, 이를 기반으로 50번 정렬 실험을 실시하고, Calibration 보정시와 Calibration 미보정시의 실험을 실시하였다.

Calibration 보정시와 미보정시 정렬오차가 모두 1㎛ 미만으로 나와 정렬성능에는 모두 양호한 것으로 나타났다. 반면, Calibration 보정시에 표준편차가 더 작게 나오는 것을 알 수 있으며, 이는 정렬 반복성을 좋게 하는 것을 확인하였다.

## 후 기

"이 연구는 2019년 국립대학 육성사업비로 지원되었음"

## REFERENCES

1. Cha, W.-Y. et al., "A Study on the Deflection and Behavior of Flat Display Glass Caused by a Conveyor Roller", Korean Journal of Computational Design and Engineering, Vol 26, No. 3, pp. 163-171, 2021.
2. Song, C.-S. et al., "A Design for the Automated Process of LCD Module Assembly Line", Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 16, No. 5, pp. 162-165, 2007.
3. Lho, T.-J. et al., "Development of Air-floating Conveyor System for FPD", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 10, No. 1, pp. 39-45, 2009.
4. Oh, C.-H., "LCD Enlargement Technology", The Proceedings of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 18, No. 4, pp. 47-53, 2004.
5. Kwon, S.-J. et al., "Kinematics and Control of a Visual Alignment System for Flat Panel Displays", Journal of institute of control robotics and systems), Vol. 14, No. 4, pp.369-375, 2008.
6. Cho, S.-M. et al., "A Study on Vision System for High Precision Alignment of Large LCD Flat Panel Display", Journal of institute of control, robotics and systems, Vol. 15, No. 9, pp. 909-915, 2009.
7. Ryu, S.-J., "Development of Panel Alignment Algorithm and Its Application to BGA Lithography Equipment", Journal of the Korean Society for Precision Engineering), Vol. 26, No. 11, pp. 77-84, 2009.
8. Lee, E.-K., "Evaporation Process Modeling for Large OLED Mass-fabrication System", Journal of the semiconductor & display technology, Vol. 5, No. 4, pp. 29-34, 2006.
9. Ji, E.-K. et al., "Large Size 60inch OLED Panel Engineering Studying", Proceeding of Conference of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 2012, No. 4, pp.12 2021.
10. Kim, H., "A Study on Development of the Align System of Roll to Roll Vacuum Evaporation equipment for Flexible OLED", Dept. of Mech.. Eng., Kongju Univ, Master Thesis, 2016.
11. Shin, D., "Measurement and Correction of PCB Alignment Error for Screen Printer Using Machine Vision (1)," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 20, No. 6, pp. 88-95, 2003.