

고차 다항식 변환 기반 카메라 캘리브레이션을 이용한 웨이퍼 Pre-Alignment 시스템

이남희 · 조태훈[†]

한국기술교육대학교 전기전자공학과, [†]한국기술교육대학교 정보기술공학부

A Wafer Pre-Alignment System Using a High-Order Polynomial Transformation Based Camera Calibration

Nam Hee Lee and Tai-Hoon Cho[†]

Dept of Electronics and Electrical Engineering

[†]School of Information Technology Engineering

ABSTRACT

Wafer Pre-Alignment is to find the center and the orientation of a wafer and to move the wafer to the desired position and orientation. In this paper, an area camera based pre-aligning method is presented that captures 8 wafer images regularly during 360 degrees rotation. From the images, wafer edge positions are extracted and used to estimate the wafer's center and orientation using least squares circle fitting. These data are utilized for the proper alignment of the wafer. For accurate alignments, camera calibration methods using high order polynomials are used for converting pixel coordinates into real-world coordinates. A complete pre-alignment system was constructed using mechanical and optical components and tested. Experimental results show that alignment of wafer center and orientation can be done with the standard deviation of 0.002 mm and 0.028 degree, respectively.

Key Words : Wafer Pre-Aligner, Least Squares Circle Fitting, Alignment, Notch Detection

1. 서 론

최근에 반도체 산업은 정보화 시대의 핵심 산업으로 중요성이 커짐에 따라 반도체 공정에서의 웨이퍼의 정렬(Alignment)의 중요성도 높아지게 되었다. 이에 웨이퍼의 중심 및 방향을 정확하게 정렬(Alignment)할 필요가 있는데 이를 위해서 정렬하기 전에 일정한 수준의 이하로 정렬을 하여 장비에 쉽게 웨이퍼를 정렬할 수 있도록 하는 것을 Pre-Aligner라고 한다[1].

Pre-Aligner에는 기구적인 방법과 광학적인 방법으로 나눌 수 있는데, 기구적인 방법은 기구적인 마찰로 인한 웨이퍼의 손상과 마이크로 단위로 정렬하기에는 적합하지 않은 단점을 가지며, 광학적인 방법 중 하나로 CCD형 선형 이미지 센서를 이용한 정렬방법이 개발되

었다[2]. 본 논문은 Area 카메라를 이용하여 웨이퍼를 한 바퀴 회전하면서 일정 각도마다 얻은 웨이퍼의 에지 이미지들로부터 웨이퍼를 정렬하는 시스템의 개발에 관한 것이다. Area 카메라를 이용하여 웨이퍼 정렬을 수행한 논문[3]에서는 카메라 캘리브레이션 방법으로 선형변환(Linear Transformation)을 사용하였으나 본 시스템에서는 좀 더 정밀한 웨이퍼 정렬을 위해 고차(High-order) Polynomial 변환을 이용한 카메라 캘리브레이션[4]을 사용하였다.

2. 웨이퍼 Pre-Alignment의 기존연구

2.1. 기구적인 방법

반도체 생산공정에서 가장 일반적인 방법으로 4개 이상의 메카니컬 그립퍼(Mechanical Gripper), 척 그리고 레이저 센서로 구성되어 있다. 웨이퍼 반송장치가 척 위에 웨

[†]E-mail : thcho@kut.ac.kr

이퍼를 올려 놓으면 척 중심방향으로 메카니컬 그립퍼를 동시에 같은 거리만큼 이동시키면 웨이퍼의 중심이 척 중심으로 미끄러지면서 이동하도록 설계하는 방법을 말한다.

이 방법은 저속, 저 정밀도의 공정에서 주로 사용하는 방법으로 웨이퍼의 편심을 보정하는 과정에서 척과 웨이퍼의 뒷면이 미끄러짐에 의한 파티클로 인한 문제가 발생하는 단점을 가지고 있다. 또한 반도체의 집적도가 높아짐에 따른 정교한 디자인룰(Design Rule)이 적용됨에 따라 이 방법의 사용은 많은 문제를 야기하며, 정밀도도 기구적인 한계에 의한 수백 마이크로 이상이 되고, 수행시간도 10~20초가 소요되어 정밀한 웨이퍼 각도 정렬에는 적용하기가 어렵다[2].

2.2. CCD형 선형 이미지 센서를 이용한 방법

척을 중심으로 웨이퍼를 회전시키면 CCD센서는 웨이퍼와 조명의 위치 때문에 웨이퍼의 그림자와 조명의 밝은 부분으로 나뉘게 된다.

제어기는 이로부터 이진화된 이미지 데이터를 얻어 에지 부분의 프로파일을 구할 수 있다. 웨이퍼의 플랫폼 위치에서 가장 많은 광량이 들어오므로 이때의 위치를 검출하여 플랫폼의 위치를 얻게 되며, 전체 신호의 변화 크기를 측정함으로써 웨이퍼의 편심량을 계산할 수 있다.

일단 얻어진 웨이퍼 이미지 프로파일은 곡선 적합화 알고리즘을 이용하여 편심량과 플랫폼/노치의 위치를 알아낸다. 우선 알아낸 센터링 오차는 편심 보정 장치에 의해 웨이퍼의 중심과 척 중심을 위치시킨다. 그런 후에 미리 지정된 플랫폼/노치의 위치로 척을 회전시킴으로써 웨이퍼의 정렬은 이루어진다[2].

2.3. Area 카메라를 이용한 방법

현재 웨이퍼의 크기가 최대 300mm로 매우 크므로 웨이퍼 전체를 Area 카메라를 이용하여 영상을 취득하여 정렬을 하기에는 카메라의 해상도가 부족하다. 따라서, Area 카메라를 이용하여 정렬을 하려면 웨이퍼 영역을 여러 부분 영역으로 나누어 여러 장의 영상을 취득하여 정렬을 하게 된다. Area 카메라를 이용하여 Pre-Alignment를 하기 위해서는 우선 카메라 캘리브레이션이 필요한데, 이를 위해서는 이미지 좌표(U, V)와 실세계 좌표(P, Q)와의 관계를 선형변환(Linear Transformation)을 이용하여 보정하였다[3].

선형변환은 $U = aP + bQ + c$, $D = dP + eQ + f$ 의 식을 이용하여 최소자승 오차(Least Square Error)상 가장 정확하게 만족시키는 파라미터 a, b, c, d, e, f를 구해 카메라 캘리브레이션을 한다.

카메라 캘리브레이션 후 웨이퍼를 회전하면서 8장의

이미지를 획득하여 Circular함수 $X^2 + Y^2 + \alpha X + \beta Y + \gamma = 0$ 의 식에 Least Minimum Square를 만족하는 α , β , γ 를 구해 웨이퍼와 척 중심간의 Offset을 구한다[3,5].

3. 제안방법

웨이퍼를 Pre-Alignment 하기 위해서는 웨이퍼의 중심 보정과 노치정렬이 필요하다. 기존의 Pre-Alignment방법들은 기구적인 방법과 광학적인 방법으로 나뉘는데, 본 논문은 광학적인 방법 중 Area 카메라로 웨이퍼의 이미지를 획득하여, Least Square Circle Fitting을 이용한 Pre-Alignment 방법으로 웨이퍼의 중심보정을 하였다.

Area 카메라를 사용할 때 흔히 발생하는 화소 및 광학왜곡을 보정하기 위해 카메라 캘리브레이션이 필요하다. 카메라 캘리브레이션은 영상 좌표계와 실세계 좌표계간의 변환관계를 정의해주는 맵핑이다. 본 논문에서는 정밀한 왜곡 보정을 위해서 고차 Polynomial을 이용한 카메라 캘리브레이션을 이용하였다.

웨이퍼를 45도씩 8번, 한 바퀴 회전하면서 이미지를 취득한 후 에지 점들의 실세계 좌표 값들을 이용하여 Least Square Circle Fitting을 통한 웨이퍼 중심의 오프셋(Offset) 및 각도를 찾아 기구부의 중심인 척과 일치시켜 웨이퍼의 중심 보정을 수행한다.

노치 정렬은 웨이퍼의 중심 보정 후 노치의 방향을 사전에 설정한 각도에 위치하도록 정렬하는 것이다. 노치 정렬은 웨이퍼의 중심보정시 획득한 8장의 이미지를 이용하여 노치의 좌표를 추출한 후, 노치의 각도를 계산하여 노치를 사전에 설정한 각도에 위치하도록 정렬하게 된다.

3.1. 고차 Polynomial을 이용한 카메라 캘리브레이션

카메라 캘리브레이션을 위해 실세계에서 수평, 수직 방향으로 20 mm 등간격인 체크형태의 플레이트(Plate)를 이용하였다(Fig. 1 참조).

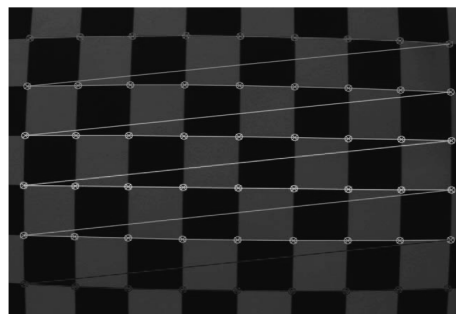


Fig. 1. Calibration Plate.

획득된 이미지에서 OpenCV[6]의 체스보드의 코너를 찾는 함수인 CvFindChessboardCorners()를 이용하여 체스보드의 코너를 검출하였다. 코너는 왼쪽 위부터 오른쪽 밑의 순서로 검출하는데, 코너의 위치를 서브픽셀로 획득하여 코너를 한층 더 정확하게 검출한다. 각각의 코너를 찾아 영상좌표 $(I_1, J_1), (I_2, J_2), \dots, (I_N, J_N)$ 로 표시할 수 있다.

실세계 좌표는 $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_N, Y_N)$ 로 나타내며 N은 캘리브레이션 포인트의 개수를 나타낸다.

영상 좌표(I, J)와 실세계 좌표(X, Y)와의 관계를 M차 Polynomial Transformation으로 표시하면

$$X = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^M k_{mn} I^m J^n \quad (1)$$

$$Y = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^M l_{mn} I^m J^n$$

N개의 영상좌표와 이에 대응되는 실세계좌표실 주어졌을 때, 위 식을 최소자승오차(Least Square Error)상 가장 정확하게 만족시키는 해를 구하게 된다[3]. 여기서는 3차 polynomial을 사용하였다(M=3).

3.2. Least Squares Circle Fitting을 이용한 웨이퍼 중심 정렬

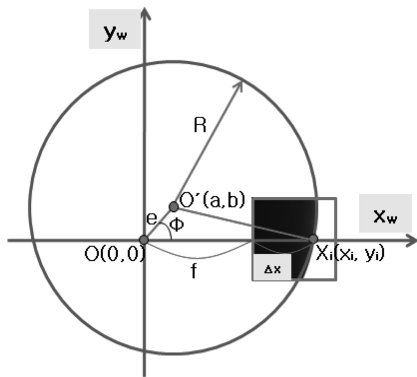


Fig. 2. The Offset Distance and Angle of a Wafer.

- e : 웨이퍼 중심(O')과 척 중심(O)사이의 거리
- Φ : 웨이퍼 중심(O')과 척 중심(O)사이의 각도
- R : 웨이퍼의 반지름
- Δx : 웨이퍼 에지 점의 영상내 실제거리
- f : 척 중심과 카메라간의 거리
- li : 척 중심과 웨이퍼 에지간의 거리(f+ Δx)

Fig. 2의 척과 웨이퍼 중심의 거리 e와 척과 웨이퍼 중심 간의 각도 Φ 를 구하기 위해 웨이퍼 중심의 좌표 a, b와 웨이퍼의 반지름 R을 하나의 식으로 나타내면 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다[5].

$$S(a, b, R) = \sum_{i=1}^N (\sqrt{(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2} - R)^2$$

여기서 $x_i = l_i \cos \theta_i$, $y_i = l_i \sin \theta_i$ 를 이용하여 극좌표를 직교좌표로 변환하여 구할 수 있다.

$li = f + \Delta x$ 를 구하기 위해서는 척 중심과 웨이퍼 에지간의 거리(f)를 구해야 되는데 이를 위해서는 앞의 식을 이용하여 R값(웨이퍼의 반지름)을 우리가 알고 있다고 하면 앞의 식을 최소화하는 값을 찾아 f값을 구할 수가 있다.

또한 Δx 를 구하기 위해서는 웨이퍼 이미지의 에지 좌표를 구한 후 고차 Polynomial을 이용한 캘리브레이션을 이용하여 실세계 좌표로 변환한다.

앞의 식을 최소화하는 a, b, R값을 구하기 위해 a, b, R로 각각을 편미분 한 결과를 0으로 놓으면 다음과 같다.

$$\frac{\partial S}{\partial a} = 2 \sum_{i=1}^n [(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - r^2](-2)(x_i - a) = 0$$

$$\frac{\partial S}{\partial a} = 2 \sum_{i=1}^n [(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - r^2](-2)(y_i - b) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial S}{\partial R} = 2 \sum_{i=1}^n [(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - r^2](-2)R = 0$$

위 식으로부터 웨이퍼의 중심좌표(a, b)와 웨이퍼의 반지름 R을 구할 수 있다.

$$a = \frac{(x^2 \cdot \bar{x} + \bar{x} \cdot y^2 - x^3 - x \cdot y^2)(\bar{y}^2 - \bar{y}^2)}{2(\bar{x}^2 - \bar{x}^2)(\bar{y}^2 - \bar{y}^2) - 2(\bar{x} \cdot \bar{y} - \bar{x} \cdot \bar{y})^2}$$

$$\frac{(x^2 \cdot \bar{y} + \bar{y} \cdot y^2 - y^3 - y \cdot x^2)(\bar{x} \cdot \bar{y} - \bar{x} \cdot \bar{y})}{2(\bar{x}^2 - \bar{x}^2)(\bar{y}^2 - \bar{y}^2) - 2(\bar{x} \cdot \bar{y} - \bar{x} \cdot \bar{y})^2}$$

$$b = \frac{(y^2 \cdot \bar{y} + \bar{y} \cdot x^2 - y^3 - y \cdot x^2)(\bar{x}^2 - \bar{x}^2)}{2(\bar{x}^2 - \bar{x}^2)(\bar{y}^2 - \bar{y}^2) - 2(\bar{x} \cdot \bar{y} - \bar{x} \cdot \bar{y})^2}$$

$$\frac{(y^2 \cdot \bar{x} + \bar{x} \cdot x^2 - x^3 - x \cdot y^2)(\bar{x} \cdot \bar{y} - \bar{x} \cdot \bar{y})}{2(\bar{x}^2 - \bar{x}^2)(\bar{y}^2 - \bar{y}^2) - 2(\bar{x} \cdot \bar{y} - \bar{x} \cdot \bar{y})^2}$$

$$R = \sqrt{a^2 - 2\bar{x} \cdot a + b^2 - 2\bar{y} \cdot b + \bar{x}^2 + \bar{y}^2}$$

그리고, 구한 a, b값을 이용하여 웨이퍼 중심과 척 중심 사이의 거리 e와 각도 Φ 를 아래와 같이 구한다.

$$e = \sqrt{a^2 + b^2} \tag{5}$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{b}{a}$$

각도 Φ 만큼 회전시킨 후, -x축 방향으로 e만큼 웨이퍼를 이동시키면 웨이퍼 중심이 척 중심에 맞게 정렬이 된다.

3.3. Notch Alignment

45도씩 회전시킨 이미지들로부터 노치의 위치를 찾기 위해 각 Y_c 좌표에서 X_c 좌표 방향으로 웨이퍼 에지의 위치데이터 값들을 구한 다음(Fig. 3), Y_c 방향으로 2차 미분을 취하면 Fig. 4와 같은 모양이 되는데 여기서 최대값을 내는 Y좌표가 노치의 좌표가 된다.

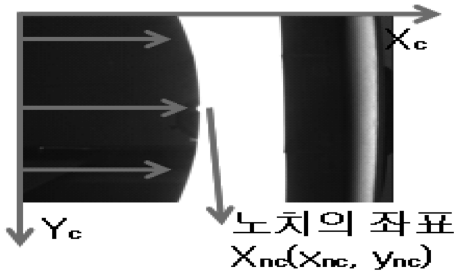


Fig. 3. An Image with a Notch.

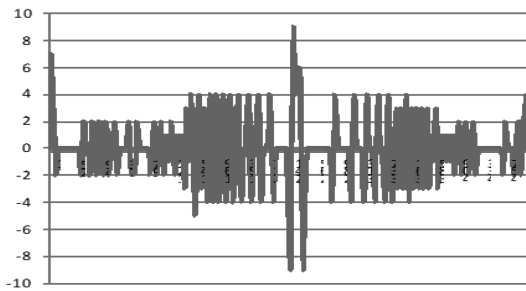


Fig. 4. Second Derivative Result.

노치 좌표를 찾은 후 노치가 들어있는 이미지의 각도는 $\theta_k = 45 \cdot k$, $k = 0, 1, \dots, 7$ 로 나타낼 수 있다. 노치가 위치한 이미지만큼 웨이퍼를 회전시키기 위해서는 $\Phi' = 45 \cdot k + \Phi$, 즉 노치가 위치한 이미지 각도 $45 \cdot k$ 과 웨이퍼 중심 정렬을 위해 회전시킨 각도 Φ 만큼을 더하여 반대방향으로 웨이퍼를 회전시켜서 노치를 카메라 시야 안에 위치할 수 있게 한다.

그런 다음, Fig. 5와 같은 영상을 취득한다. 노치 정렬의 기준은 B점으로 설정하였는데, B점은 영상의 중심 행(row) 240에 있는 웨이퍼의 에지점이다. 또한 A는 웨이퍼의 중심 좌표이고, C는 노치의 좌표가 된다. 이때 노치의 각도(α)는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{AB^2 + AC^2 - BC^2}{2AB \cdot AC} \right) \tag{6}$$

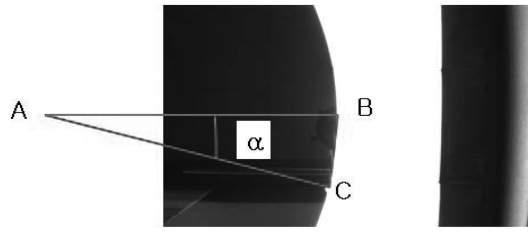


Fig. 5. An Image with a Notch.

웨이퍼를 α 만큼 회전시키면 Fig. 6과 같이 노치(Notch)를 영상중심 행에 위치하게 되어 노치 정렬이 이루어진다.

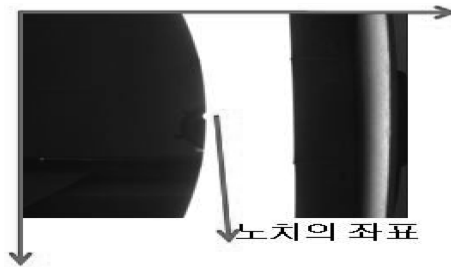


Fig. 6. Notch Alignment Result.

4. 실험 및 평가

4.1. 실험환경

Fig. 7은 제작된 웨이퍼 프리얼라이너를 보여주고 있다.

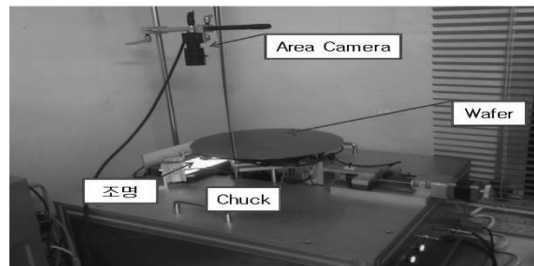


Fig. 7. Pre-alignment System.

웨이퍼를 정렬시키는 기구부는 웨이퍼를 회전시키는 회전스테이지와 웨이퍼를 한 축으로 이동시키는 1축 이동스테이지로 구성된다. 회전 스테이지는 초당 20도 회전속도를 가지며, 반복 정밀도는 $\pm 0.003^\circ$ 이고, X축 이동스테이지는 스테핑모터로 구동되며 분해능은 5 μ m이다.

카메라는 HR-50 Area카메라를 사용하여 웨이퍼의 에지 이미지를 얻기 위해 웨이퍼의 가장자리와 카메라를 수직으로 배치시켰고, 적색 LED 조명장치를 이용하여 웨이퍼의 반사와 주위 조명의 영향을 최소화시켜 깨끗한 이미지를 획득하기 위해서 웨이퍼 밑에 조명을 배치시켰다.

카메라에 초점거리가 4~12 mm인 Tamron 렌즈를 부착하여 640×480크기의 영상을 Meteor2-MC/4 PCI frame grabber 보드로 취득하였다. 카메라의 FOV(Field Of View)는 170×127 mm 정도였다. 영상에서 맨 위 웨이퍼 에지점과 맨 아래 웨이퍼 에지점이 웨이퍼 중심과 이루는 각이 45도 보다 약간 크게 되도록 FOV를 설정하였다.

4.2. 실험결과

Table 1은 웨이퍼 중심과 척 중심간의 거리 e 와 각도 Φ 를 다양한 위치로 30회 놓은 후 웨이퍼 중심 정렬을 측정한 결과이다. 평균 0.002 mm, 표준편차 0.002 mm로 0.008 mm(3*표준편차+평균)이내로 중심 정렬이 되는 것을 확인할 수가 있다.

Table 2는 웨이퍼의 노치 각도를 여러 가지 위치에 30회 위치 시킨 후 나온 노치 정렬결과이다. 평균 0.03도, 표준편차 0.028도의 정렬 정밀도를 보여주고 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 웨이퍼 Pre-Alignment하기 위한 방법 중 Area 카메라와 Least Square Circle Fitting을 이용한 방법을 이용하여 웨이퍼의 중심좌표를 찾아 웨이퍼의 중심과 척의 중심간의 거리 및 각도를 찾는 Alignment 방법을 제안하였다. 보다 정밀한 카메라 캘리브레이션을 위해서 고차 Polynomial변환을 이용한 카메라캘리브레이션 방법을 사용하였다.

다양한 웨이퍼 정렬 실험 결과 웨이퍼 중심 정렬 및 노치 정렬 성능이 만족할 만한 성능을 보여주었다.

추후 과제로는, 현재 웨이퍼 정렬 및 노치 정렬에 소요되는 시간이 20초 정도이나 웨이퍼를 한 바퀴 회전하는데 18초가 걸리기 때문에 스텝모터 속도를 개선하

Table 1. Wafer Alignment

횟수	웨이퍼 중심과 척 중심 간의 각도(Φ , $^\circ$)	보정 전 웨이퍼 중심과 척 중심 간의 거리(e , mm)	보정 후 웨이퍼 중심과 척 중심 간의 거리(e , mm)
1	-175.799	1.046	0.0062
2	-121.217	1.108	0.0029
3	-33.0134	1.108	0.001
4	-111.889	1.109	0.0021
5	-91.9823	1.109	0.0067
6	-115.365	1.115	0.0041
7	-115.688	1.154	0.0068
8	-84.509	1.155	0.0069
9	-66.325	1.154	0.0023
10	64.66666	1.221	0.0003
11	100.0911	1.153	0.0001
12	-102.35	1.153	0.0004
13	-59.5983	1.575	0.0005
14	-69.8474	1.262	0.0003
15	62.92678	1.369	0.0004
16	-175.96	1.369	0.0003
17	87.79719	1.373	0.0006
18	92.31768	1.415	0.0002
19	-0.51602	1.414	0.0002
20	38.88253	1.477	0.0006
21	-110.086	1.523	0.0002
22	116.4858	1.638	0.0004
23	90.78562	1.743	0.0004
24	-179.026	1.783	0.0007
25	70.97954	1.831	0.0009
26	112.8425	1.891	0.0011
27	106.1369	1.891	0.0009
28	71.0385	2.048	0.0007
29	63.28013	2.2	0.0008
30	114.9628	2.154	0.0007

는 방법을 찾아 처리시간을 최소화 하는 방법이 필요하다.

Table 2. Notch Alignment

횟수	보정 후 노치좌표 (X, P1xel)	보정 후 노치좌표 (Y, P1xel)	보정 전 노치 각도 (°)	보정 후 노치 각도 (°)
1	300.51	239.92	258.883	0.008
2	300.42	239.93	117.526	0.007
3	300.5	239.32	201.782	0.069
4	300.79	240.43	191.208	0.044
5	300.51	240.03	182.4	0.003
6	300.37	240.02	158.227	0.002
7	300.8	239.99	193.879	0.001
8	300.76	240.32	264.281	0.032
9	300.39	240.34	204.856	0.034
10	300.99	239.95	161.029	0.005
11	301.06	239.95	190.038	0.005
12	300.86	240.25	73.664	0.025
13	301.18	240.02	100.917	0.002
14	300.98	240.28	37.917	0.028
15	301.51	240.78	240.584	0.079
16	300.93	239.98	166.242	0.002
17	301.42	240.23	232.508	0.023
18	300.83	239.29	165.024	0.072
19	301.34	239.81	332.402	0.019
20	301.16	239.03	95.385	0.098
21	300.95	240.25	142.803	0.025
22	301.19	239.9	228.172	0.01
23	300.95	240.2	106.098	0.02
24	301.34	240.66	285.388	0.067
25	301.2	239.87	249.512	0.013
26	300.99	240.24	39.675	0.024
27	301.36	239.29	239.475	0.072
28	301.6	239.42	235.038	0.059
29	301.26	239.89	299.19	0.011
30	301.17	239.84	181.073	0.016

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참고문헌

1. 이남희, 조태훈, "Least Square Circle Fitting을 이용한 Pre-Alignment", 한국해양정보통신학회 추계학술대회 논문집, 13권, 2호, pp. 410-413, 2009.
2. 박홍래, 유준, "웨이퍼 정렬법과 정밀도 평가", 제어·자동화·시스템공학회 논문지, 제8권, 제9호, pp. 812-817, 2002.
3. Hee-Sub Lee, Jae-Wook Jeon, Joon-Woo Kim, Jong-Eun Byun, "A 12-inch wafer prealigner", Micro-processors and Microsystems 27, pp. 151-158, 2003.
4. 조태훈, "고차 polynomial을 이용한 정밀한 카메라 캘리브레이션", Proceedings of KFIS Spring Conference 2007. Vol.17, No.1. pp. 413-416, 2007.
5. Qu Dongsheng, Quio Suilong, Rong Weibin, Song Yixu, Zhao Yannan, "Design and Experiment of The wafer Pre-alignment System", Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp. 1483-1488, August 5-8, 2007.
6. <http://opencv.willowgarage.com/wiki/>

접수일: 2010년 2월 16일, 심사일: 2010년 3월 3일

게재확정일: 2010년 3월 15일