

# 평판 디스플레이 비전 정렬 시스템의 기구학 및 제어

## Kinematics and Control of a Visual Alignment System for Flat Panel Displays

권상주\*, 박찬식, 이상무  
(SangJoo Kwon, Chansik Park, and Sang Moo Lee)

**Abstract :** The kinematics and control problem of a visual alignment system is investigated, which plays a crucial role in the fabrication process of flat panel displays. The first solution is the inverse kinematics of a 4PPR parallel alignment mechanism. It determines the driving distance of each joint to compensate the misalignment between mask and panel. Second, an efficient vision algorithm for fast alignment mark recognition is suggested, where by extracting essential feature points to represent the geometry of a mark, the geometric template matching enables much faster object recognition comparing with the general template matching. Finally, the overall visual alignment process including the kinematic solution, vision algorithm, and joint control is implemented and experimental results are given.

**Keywords:** Flat Panel Display(FPD), visual alignment, parallel mechanism, pattern recognition.

### I. 서론

평판 디스플레이 산업에서 비전 정렬 시스템은 디스플레이 제작 공정의 생산성을 결정 짓는 핵심 기술 중의 하나이다. 비전 정렬 시스템의 목적은 TFT/LCD, PDP, OLED와 같은 디스플레이 생산 라인에서 증착, 리소그래피, 프린팅과 같은 전 공정(pre-processing) 단계와 결함 검사, 패키징과 같은 후 공정(post-processing) 단계를 수행하기 전, 연속적으로 이송되는 글라스 패널(glass panel)을 특정 패턴 마스크(mask)에 정렬시키는 것이다. 따라서 비전 정렬 시스템의 정렬 성능과 정밀도는 곧바로 제품의 품질과 생산 단가를 결정하는 중요한 요소가 된다고 할 수 있다.

최근 차세대 평판 디스플레이 패널의 크기는 갈수록 대형화되어 가고 있는 반면 패널의 픽셀 사이즈는 점점 작아지고 있어 미래의 마스크-패널 정렬 시스템은 제어 정밀도 측면에서 더욱 엄격한 요구조건을 만족해야 한다. 비전 정렬 시스템은 기본적으로 마스크와 패널 사이의 정렬 오차를 인식하기 위한 비전 시스템과 정렬 오차를 허용 오차범위 이내로 보상하기 위한 다축의 정밀 스테이지로 구성된다.

대중량 마스크를 높은 정밀도로 핸들링하기 위해서는 스테이지의 강성(stiffness)과 가반 하중(payload)이 충분해야 하는데 이를 만족시키기 위해서 보통 병렬 메커니즘 구조의 스테이지를 채택한다. 본 논문에서는 아직까지 디스플레이 산업에 일반화되어 있지 않은 4축 구조의 4PPR 병렬형 스테이지의 기구학 해석을 다룬다. 평면 상에서 마스크와 패널을 정렬할 경우, 3개의 독립적인 구동 축을 갖는 스테이지 만으로도 평면 3자유도 운동을 결정할 수 있으나, 여기에 한 개의 구동 축을 추가하면 가반 하중과 제어 모션의 강성을 더

욱 증가시킬 수 있는 장점을 갖는다.

한편, 마스크와 패널 표면의 특정 위치에 가공 또는 프린팅 되어 있는 정렬 마크(즉, 얼라인 키)를 비전 알고리즘을 통해 인식하기 위해서는 카메라에서 획득된 영상에 대한 전처리 과정과 각 정렬 마크 객체(object)의 중심점(centroid) 위치를 결정하기 위한 패턴 인식 과정을 거치게 된다. 대표적인 템플릿 패턴 매칭 방법으로는 농담정규화상관법(Normalized Gray-scale Correlation(NGC))과[1,2] 점상관법(Point Correlation (PC))이 있으며[3], 이 외에도 에지(edge) 기반 점상관법[4]을 포함하여 다양한 패턴 인식 기법들이 존재한다[5,6]. 이러한 방법들은 인식 대상이 되는 객체의 템플릿(template)을 이용하여 특정 객체를 인식할 수 있는 일반적인 알고리즘이라고 할 수 있다. 그러나 NGC방법에서는 주어진 영상의 모든 픽셀에 대한 벡터 연산이 필요하고 PC 방법에서도 주요 특징점(feature points)을 추출하는 별도의 과정이 필요하므로 입력 영상의 픽셀수가 증가할수록 연산 시간이 기하급수적으로 증가하는 단점이 있다.

이 논문에서는 평판 디스플레이의 얼라인 키가 대부분 원, 십자, 다이아몬드와 같이 비교적 단순한 형상을 갖는 점을 착안하여, 비전 인식 시간을 크게 단축시킬 수 있는 실용적인 방법으로서 기하적 템플릿 매칭(Geometric Template Matching(GTM)) 기법을 제시한다. 한편, GTM은 정렬 마크에서 주요 특징점들의 위치를 미리 결정하고 이러한 특징점들의 조합을 기하적 템플릿으로 정의한다. 그리고 패턴 매칭 과정에서 이러한 특징점만을 매칭함으로써 결과적으로 NGC나 PC에 비해 매우 빠른 비전 인식을 가능하게 한다.

디스플레이나 반도체 산업에서 비전 정렬 시스템의 중요성은 매우 큰 반면 관련 연구 논문은 매우 드물다고 할 수 있다. 비전 정렬 시스템과 관련된 몇가지 문헌의 예를 들면, 다이싱 공정에서의 2단계 정렬 방법[7], 모세관 힘을 이용한 웨이퍼 자기 정렬 방법[8], 하이브리드 정렬을 위한 개선된 템플릿 매칭 기법[9], 정렬 속도를 증가시키기 위한 여분의 센서 인티그레이션 방법[10] 등이 있다.

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2008. 1. 31., 채택확정 : 2008. 2. 24.

권상주 : 한국항공대학교 항공우주기계공학부(sjkwon@kau.ac.kr)

박찬식 : 삼성전자㈜ 디스플레이사업부(creepworld@hotmail.com)

이상무 : 한국생산기술연구원 로봇기술본부(lsm@kitech.re.kr)

※ 본 연구는 지식경제부 성장동력사업인 “지능형 극초정밀 생산로봇 기술개발” 사업에 의해 지원되었음.

이 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 먼저 2장에서는 비전 정렬 시스템의 개요를 설명한다. 3장에서는 4PPR 스테이지에 대한 역기구학 해석 결과를 다루며, 4장에서는 얼라인 키 인식을 위한 비전 알고리즘을 개발한다. 5장에서는 정렬 오차 보상을 위한 조인트 제어 문제를 언급한다. 6장에서는 실험 결과를 보이고, 마지막으로 7장에서 결론을 맺는다.

**II. 비전 정렬 시스템**

그림 1은 증착 장비의 진공 챔버 내에 장착된 비전 정렬 시스템의 예를 나타낸다. 그림과 같이 글라스 패널이 핸들링 로봇에 의해 장비 안으로 진입하면 비전 정렬 공정이 완료된 후 증착 공정이 시작된다. 공정이 완료된 패널은 핸들링 로봇에 의해 다음 공정을 위한 스테이션으로 이송된다. 실제 생산 공정에서는 비전 정렬 이전에 전정렬(pre-alignment) 과정을 통해 거쳐 마스크와 패널의 정렬 마크가 카메라의 가시 영역(field-of-view) 안으로 들어오게 된다.

비전 정렬 시스템의 제어 루프는 그림 2의 개념도와 같이, 얼라인 키를 인식하기 위한 비전 루프와 정렬 오차를 보상하기 위한 스테이지 제어 루프로 구성된다. 비전 시스템은 두 대의 CCD 카메라를 이용하여 마스크와 패널 각 두 부분의 정렬 마크 영상을 획득하며, 마크 인식 알고리즘은 획득된 영상으로부터 중심점을 추출한다. 다음에 마크의 중심점 위치를 이용하여 평면 정렬 오차가 계산되며 역기구학 해를 통해 각 조인트의 구동거리가 산출된다. 마지막으로 정해진 궤적에 따라 각 조인트에서 모터 제어가 수행되면 초기 정렬 오차가 1차적으로 보상된다. 이 때 허용 오차를 벗어났다면 다음 번 비전 루프가 작동하게 되는데 보통 2-3회 이러한 과정을 거쳐 정렬이 완료된다. 결국 비전 루프는 외부적인 센서 피드백을 통해 정렬 스테이지의 제어 루프를 위한 기준 명령을 생성하며, 스테이지의 각 조인트는 모터 내부의 센서 피드백을 통해 기준 궤적을 추종한다.

**III. 4PPR 정렬 스테이지의 기구학**

**1. 정렬 오차 결정**

병렬형 스테이지는 직렬형에 비해 높은 가반하중과 고장

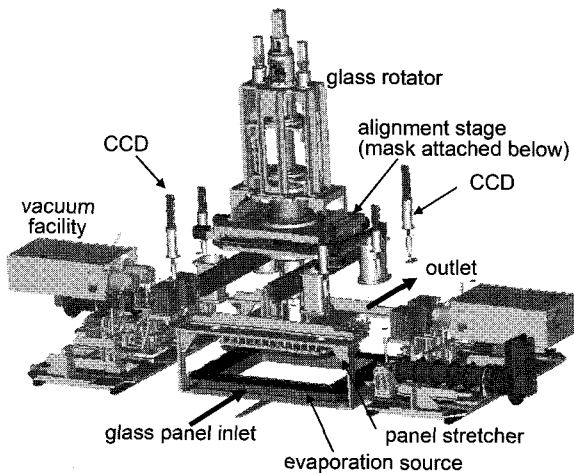


그림 1. 증착 장비의 비전 정렬 시스템(두산메카텍).  
Fig. 1. Visual alignment system in the evaporation chamber.

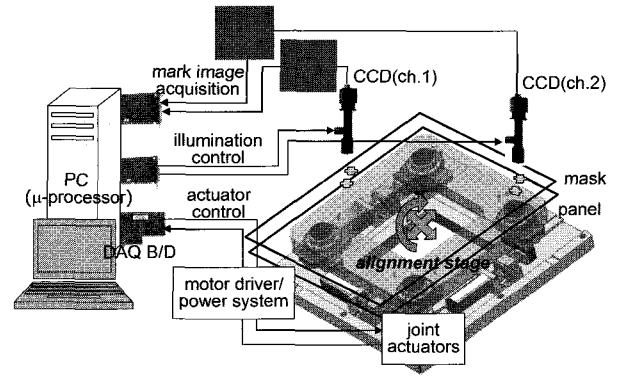


그림 2. 비전 정렬 시스템의 제어 루프 개념도.  
Fig. 2. Control loop of the visual alignment system.

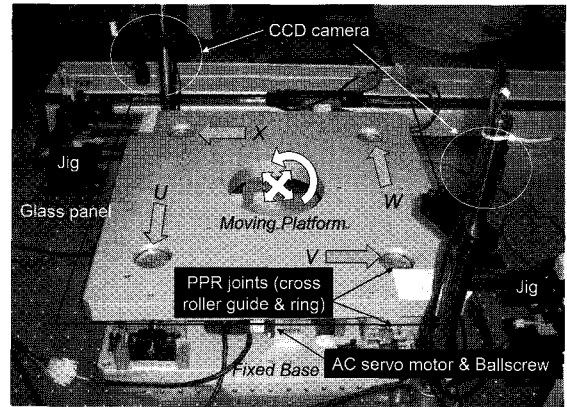


그림 3. 4PPR 병렬형 정렬 스테이지.  
Fig. 3. 4PPR parallel alignment stage.

성 구조를 갖는 장점이 있는 반면, 말단부(end-effector)의 작업 영역이 직렬형에 비해 크게 제한되는 단점이 있다. 그러나 비전 정렬 시스템의 경우 스테이지 각 축의 동작 거리가 보통 수 mm 이하이기 때문에 병렬 스테이지의 작업 영역이 큰 문제가 되지는 않는다. 또한 병렬형 위치결정 메커니즘은 직렬형 매니퓰레이터에 비해 조인트 제어기 구성을 위한 역기구학 해를 쉽게 구할 수 있다는 점도 장점에 속한다고 볼 수 있다.

그림 3은 4개의 림(limb)이 각각 PPR(Prismatic-Prismatic-Revolute) 조인트로 구성된 4PPR 병렬형 스테이지이다. 각 림(limb)에서 첫번째 직선(prismatic) 조인트는 모터에 의해 구동되는 능동(active) 조인트이다. 사실 평면 얼라인 문제에서는 3개의 병렬 조인트만 구동되어도 스테이지 플랫폼 작업 공간(task space)의 3 자유도( $x, y, \phi$ ) 운동을 구현할 수 있지만, 4축이 모두 구동될 경우에는 가반하중과 제어 정밀도를 더욱 증가시킬 수 있다는 장점을 갖는다. 다만 이 경우에는 기구적 잠금(lock)을 방지하기 위한 제어 로직(logic)이 추가적으로 고려되어야 한다.

영상처리와 패턴 인식 과정을 통해 각 정렬 마크의 중심점이 산출되면 마스크와 패널 간의 정렬 오차는 다음과 같은 순서를 따라 결정할 수 있다. 먼저 그림 4에서 패널 상의 두 중심자 마크의 중심점 위치를 기준 좌표계에 대하여 각각  $C_1 = (C_{1x}, C_{1y})$ ,  $C_2 = (C_{2x}, C_{2y})$  로 정의하고 마스크의 두 원

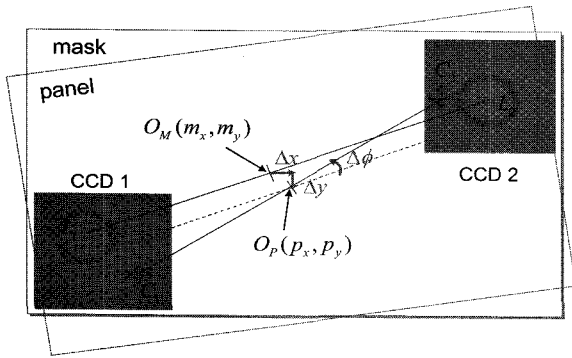


그림 4. 마스크(원형 마크)와 패널(십자 마크) 사이의 정렬 오차.

Fig. 4. Misalignment between mask(circle) and panel(cross).

형마크의 위치는  $L_1 = (L_{1x}, L_{1y})$ ,  $L_2 = (L_{2x}, L_{2y})$  로 정의한다. 그러면 두 십자 마크의 중심점을 잇는 직선의 중심은 다음 식과 같고

$$p_x = \frac{C_{1x} + C_{2x}}{2}, p_y = \frac{C_{1y} + C_{2y}}{2} \quad (1)$$

두 원형 마크 중심점을 잇는 직선의 중심은 다음 식과 같다.

$$m_x = \frac{L_{1x} + L_{2x}}{2}, m_y = \frac{L_{1y} + L_{2y}}{2} \quad (2)$$

스테이지의 구동 플랫폼에 마스크가 부착되어 패널 쪽으로 정렬된다면 마스크-패널 간 정렬 오차는 다음 식으로 주어진다.

$$\begin{aligned} \Delta x &= p_x - m_x = \frac{C_{1x} - L_{1x} + C_{2x} - L_{2x}}{2} \\ \Delta y &= p_y - m_y = \frac{C_{1y} - L_{1y} + C_{2y} - L_{2y}}{2} \\ \Delta \phi &= \tan^{-1} \left( \frac{L_{2y} - L_{1y}}{L_{2x} - L_{1x}} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{C_{2y} - C_{1y}}{C_{2x} - C_{1x}} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

## 2. 4PPR 스테이지의 역기구학

정렬 스테이지의 역기구학 문제는 (3)에 의해 주어지는 말단부(end-effector)의 정렬오차 보상 거리에 대한 각 구동 축의 이동 거리를 결정하는 것이다. 그림 5에서 스테이지의 베이스는 고정된 4점 ( $P, Q, R, S$ )로 정의되고 이동 플랫폼(즉, 말단부)은 네 점 ( $A, B, C, D$ )에서 PPR 조인트를 통해 고정된 베이스와 연결된다. 이 때 기준 좌표계의 원점은 베이스의 중심점  $O_1$ 에 위치한다고 가정한다. 따라서 이동 플랫폼이 홈 위치에 있을 때는 ( $P, Q, R, S$ )와 ( $A, B, C, D$ )가 서로 일치한다.

베이스의 4개 고정점들의 위치가 주어질 때 우선 다음 관계식들을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \overline{O_2A} &= R(\Delta\phi)\overline{O_1P}, \quad \overline{O_2B} = R(\Delta\phi)\overline{O_1Q} \\ \overline{O_2C} &= R(\Delta\phi)\overline{O_1R}, \quad \overline{O_2D} = R(\Delta\phi)\overline{O_1S} \end{aligned} \quad (4)$$

단,  $R(\Delta\phi) = \begin{bmatrix} \cos \Delta\phi & -\sin \Delta\phi \\ \sin \Delta\phi & \cos \Delta\phi \end{bmatrix}$ 은 회전 행렬을 나타낸다. 그

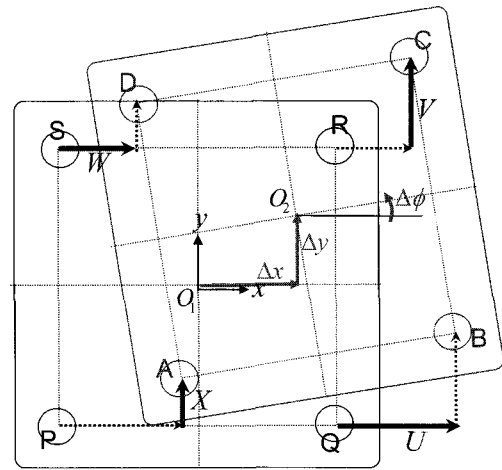


그림 5. 정렬 오차에 대한 각 조인트의 구동 거리 ( $U, V, W, X$  실선: 구동축).

Fig. 5. Driving distances of active joints ( $U, V, W, X$  solid line) for a misaligned posture.

리고 이동 플랫폼 상의 네 점의 위치는 다음 식들에 의해 계산될 수 있다.

$$(x_A, y_A) = \overline{O_1A} = \overline{O_1O_2} + R(\Delta\phi)\overline{O_1P} \quad (6)$$

$$(x_B, y_B) = \overline{O_1B} = \overline{O_1O_2} + R(\Delta\phi)\overline{O_1Q} \quad (7)$$

$$(x_C, y_C) = \overline{O_1C} = \overline{O_1O_2} + R(\Delta\phi)\overline{O_1R} \quad (8)$$

$$(x_D, y_D) = \overline{O_1D} = \overline{O_1O_2} + R(\Delta\phi)\overline{O_1S} \quad (9)$$

단,  $\overline{O_1O_2} = (\Delta x, \Delta y)$ .

그러면 그림 5에서 각 구동 입력 조인트에서의 정렬오차 보상거리(즉, 역기구학 해)는 다음 관계식들로 결정될 수 있다.

$$\begin{aligned} U &= x_B - x_Q, & V &= y_C - y_R, \\ W &= x_S - x_D, & X &= y_P - y_A \end{aligned} \quad (10)$$

위 식에서  $W$ 와  $X$ 축의 부호는 모터 정회전 방향이 그림 5의 표시와 반대인 경우이다. 만일 그림 5에서 각 변의 길이가 모두  $h$ 로 동일한 값을 갖는다면 (10)은 다음과 같이 다시 정리된다.

$$\begin{aligned} U &= \Delta x + f(\Delta\phi), & V &= \Delta y + f(\Delta\phi), \\ W &= -\Delta x + f(\Delta\phi), & X &= -\Delta y + f(\Delta\phi) \end{aligned} \quad (11)$$

여기서  $f(\Delta\phi) = \frac{1}{2}h(\cos \Delta\phi + \sin \Delta\phi - 1)$ 이다.

## IV. 정렬 마크 인식을 위한 비전 알고리즘

본 절에서는 비전 정렬 시스템의 얼라인 키를 고속으로 인식할 수 있는 효율적인 비전 알고리즘을 제안한다. 그림 6은 알고리즘의 전체 흐름도를 나타내며 기본적인 영상처리 기법들을 이용하는 전처리 과정과 패턴 매칭 과정을 거쳐 각 마크의 중심점들이 추출된다. 본 절의 알고리즘을 적용하기 위해서는 전정렬(pre-alignment) 공정을 통해 마스크와 패널의 얼라인 키들이 모두 비전 카메라의 가시영역(field-of-view) 안에 들어온다는 가정이 전제되어야 한다.

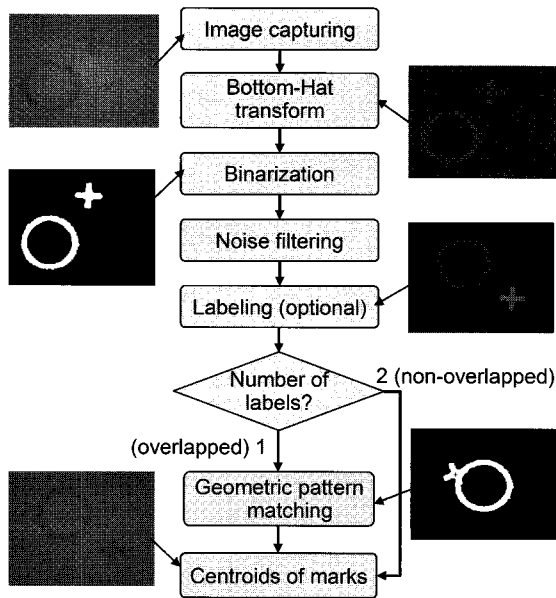


그림 6. 얼라인 키 인식을 위한 영상처리 흐름도.  
Fig. 6. Overall flow for alignment key recognition.

1. 전처리 과정

Bottom-Hat 변환: 영상처리 과정을 통해 특정 객체를 인식하기 위해서는 입력 영상 전 영역에 걸친 조명의 균일성이 매우 중요하다. 그러나 안정된 광원의 경우에도, 카메라 영상은 가시영역(field-of-view)의 중앙 부분이 가장자리보다 밝게 나타나는 경우가 많다. 그림 6에서 bottom-hat 변환은 조명의 불균일성 또는 조명 조건의 변화에 대한 비전 알고리즘의 강인성을 확보하기 위한 것이다. 한편, 모폴로지(morphology) 방법[12]에 의거하여 변환된 영상은 다음 식으로 결정된다.

$$h = (f \cdot b) - f \tag{12}$$

여기서  $f$ 는 원 영상,  $b$ 는 원형 모폴로지, 그리고  $(f \cdot b)$ 는 두 데이터 간의 닫힘(closing) 연산을 의미한다. 위 과정을 거치면 모폴로지 크기보다 작은 객체는 제거되고 나머지 배경만이 추출되어 그림 6에 나타낸 것과 같은 균일한 배경을 갖는 영상이 얻어진다.

이진화 및 노이즈 필터링: 객체를 배경으로부터 분리(segretation)하기 위해서는 먼저 동적 thresholding 과정을 통해 이진화(binartization) 영상을 얻는다. 한편, 이진 영상에서 매우 작은 영역을 갖는 노이즈 패턴들은

$$\hat{f} = (f \circ b) \cdot b \tag{13}$$

와 같이 이진 영상  $f$ 와 모폴로지  $b$  사이의 열림(opening) 연산과 닫힘(closing) 연산을 반복함으로써 효과적으로 제거시킬 수 있다.

라벨링(labeling): 노이즈가 제거된 카메라 영상에는 정상적으로 두 개의 객체(즉 마스크와 패널의 마크)만이 존재하게 된다. 만일 라벨링을 적용한 후의 영상에서 라벨 영역이 둘이라면 두 객체가 서로 겹쳐지지 않고 분리되어 있는 경우이므로 각 마크의 중심점은 다음과 같이 면적 중심법을 이용하여 쉽게 결정할 수 있다.

$$X_c = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} x_i, Y_c = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} y_i \tag{14}$$

여기서  $n$ 은 한 라벨 영역의 픽셀 수이고  $(x_i, y_i)$ 는 각 픽셀의 좌표 값이다. 반면, 라벨 영역이 하나만 존재한다면 두 객체가 서로 겹쳐진 경우이고 이 때는 별도의 패턴 인식기법이 적용되어야 한다.

2. 기하적 템플릿 매칭

머신 비전 시스템의 성능과 신뢰성은 사실상 객체(object)를 신속 정확히 인식할 수 있는 패턴인식 알고리즘의 성능에 의해 결정된다. 농담정규화상관법(NGC)[1,2] 또는 점상관법(PC)[3]은 머신 비전에서 많이 응용되고 있는 대표적인 매칭 기법으로서 템플릿이 주어지는 일반적인 객체에 적용할 수 있다는 장점을 가지지만 연산시간 측면에서 실시간 제어에 적용하기에는 무리가 있다. 비전 정렬 시스템의 경우에는 조명, 배경 등의 비전 환경이 정형화되어 있으며, 인식 대상이 되는 객체, 즉 얼라인 키의 형상이 비교적 단순하다는 점에 착안하면 고속 매칭 기법을 고안할 수 있다.

디스플레이 마스크-패널 정렬에서는 그림 7과 같은 원형 마크와 십자 마크가 가장 일반적이다. 먼저 그림에 표시된 특징점들의 벡터 집합을 각 마크의 기하적 템플릿으로 정의한다. 기하적 템플릿 매칭(geometric template matching(GTM))에서는 주어진 입력 영상에서 매칭 영역의 모든 픽셀을 일단 중심점으로 가정한다. 다음에, 주변의 기하적 특징점들을 순환적으로 비교하여 모든 특징점들이 같은 밝기(0 또는 255)를 가질 때 그 픽셀을 마크의 중심점 후보로서 저장한다. 정렬 마크의 두께를 고려하면 이러한 중심점 후보들이 실제 중심점 주변에 다수 분포할 것이므로 최종적으로는 이들에 평균값을 취함으로써 최종적인 중심점을 결정할 수 있다.

한편, 모든 방향으로 대칭인 원형 마크와는 달리, 십자 마크의 경우에는 회전 효과를 고려해야 한다. 십자 마크는 90도 마다 같은 특징점을 만나게 되므로 매칭 영역의 각 픽셀에 대하여 0도에서 90도까지 일정 간격으로 템플릿을 회전시키면서 원형 마크와 같은 과정을 반복하면 중심점을 찾을 수 있다.

$M \times N$  픽셀 사이즈의 입력 영상과  $A \times B$  사이즈의 템플릿 영상에 대하여 NGC 매칭에서는 상관계수를 계산하기 위해  $M \times N \times A \times B$  회의 벡터 연산이 요구된다. 그리고 PC 매칭에서는 템플릿 영상에서  $P$  개의 특징점들을 찾는 별도의 알고리즘 연산시간 외에  $M \times N \times P$  번의 벡터 연산이 필요하다. 반면 본 논문에서 제시된 GTM기법에서는 최소 개수

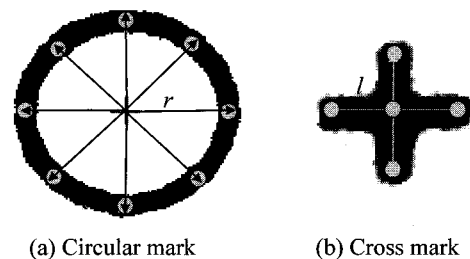


그림 7. 원형 마크와 십자 마크의 기하적 템플릿.  
Fig. 7. Geometric template of circular mark and cross mark.

의 특징점들을 순환문을 통해 입력 영상과 직접 매칭하게 되며 마크의 회전 효과도 직접적으로 고려할 수 있다는 장점을 가지고 있어 전체적인 연산시간이 크게 단축된다.

**V. 정렬 오차 보상을 위한 스테이지 제어**

정렬 스테이지의 제어 시스템은 그림 8과 같은 계층적 구조를 갖는다. 외부의 비전 루프는 정해진 샘플링 시간마다 또는 트리거링 신호가 발생할 때마다 얼라인 키를 인식하고 중심점 위치를 추출한다. 다음에 기구학적 해를 통해 마스크와 패널 사이의 정렬 오차와 정렬 오차 보상을 위한 스테이지 각 구동축의 이동 거리가 산출된다. 궤적 플래너(trajjectory planner)는 각 구동축의 기준 이동 명령(역기구학 해)에 대하여, 예를 들어 다음과 같은 3차 다항식 시간 궤적을 생성한다.

$$r(t) = \begin{cases} \frac{3D}{t_r^2}t^2 - \frac{2D}{t_r}t^3 & (0 \leq t \leq t_r) \\ D & (t_r < t \leq t_f) \end{cases} \quad (15)$$

위에서  $D$ 는 (10)에 의하여 결정되는 값들이고  $t_r$ 은 다항식의 상승시간이고  $t_f$ 는 조인트 제어 종료시간으로서, 이들은 실험을 통하여 제어기 계인과 더불어 조절되어야 하는 값들이다.

그림 8에서 내부 조인트 제어 루프는 비전 루프와 비교하여 훨씬 빠른 샘플링 시간 간격으로 내부 센서(엔코더)값을 피드백하여 수행된다. 비전 정렬 스테이지와 같이 각 구동축의 이동량이 수백 또는 수십 마이크로에 불과한 마이크로 제어 문제의 경우, 조인트 제어기의 성능은 마찰력 보상 효과에 달려 있다고 볼 수 있다. 따라서 PID 제어기, LQ제어기와 같은 일반적인 선형 제어기만으로는 제어 성능에 일정한 한계가 나타날 수 있으므로 조인트 제어기에 스테이지 각 축의 마찰력을 보상하기 위한 추가적인 함수를 도입하는 것이 필요하다. 마찰력 보상 입력은 스테이지 각 축에 대한 마찰력 모델을 식별함으로써 구현할 수 있다. 또는 섭동관측기[13]와 같은 간접적인 보상 방법을 적용하는 것도 매우 효과적이다.

한편, 그림 3의 정렬 스테이지는 4개의 구동 축( $U, V, W, X$ )을 갖고 있으나 3개의 축( $U, V, W$ )만이 구동되는 경우에도 평면 정렬을 위한 작업 공간에서의 3자유도 운동을 구현할 수 있다. 4축이 모두 구동될 경우에는 모든 축이 서로 동기적으로 조화롭게 움직이도록 제어되어야만 기구적 잠금(lock)을 방지할 수 있다.

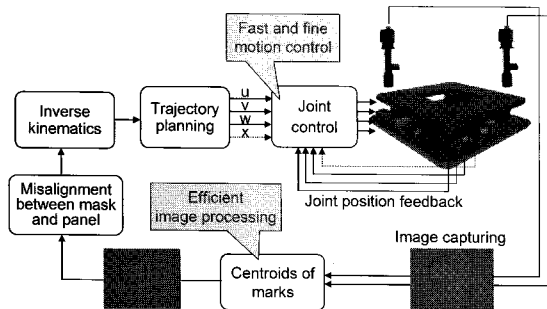


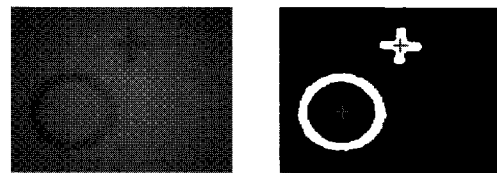
그림 8. 비전에 기반한 정렬 스테이지의 제어 루프.  
Fig. 8. Vision-based control loop of the alignment stage.

**VI. 실험 결과**

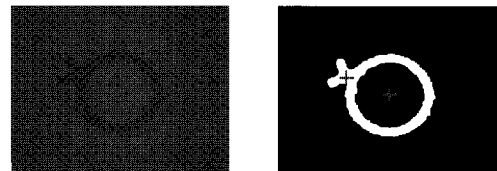
**1. 얼라인 마크 인식 실험**

그림 3의 비전 정렬 시스템 실험 환경에서 CCD 카메라는 640 x 480 픽셀 사이즈를 가지며 카메라의 가시 영역은 6.4 x 4.8mm이다. 따라서 픽셀 당 분해능(resolution)은 10 마이크로이다. 프레임 그래버(grabber) 보드에서는 15fps의 속도로 영상을 캡처링하며, 연산 프로세서는 펜티엄 3GHz이다. 또한, 그림 7에서 원형 마크의 반지름은 1mm이고 십자 마크 각 변의 길이는 1mm이다.

그림 9는 주어진 입력 영상에 대한 중심점 추출 실험 결과이다. 먼저 두 마크가 겹쳐지 않은 경우에는 그림 6의 라벨링 단계에서 중심점이 산출되며 전체 계산시간은 31msec이다. 두번째로 두 마크가 겹친 경우에는 그림 7의 기하적 템플릿에 따라 패턴 매칭이 수행되며 계산시간은 47msec이다. 앞 장에서 제시된 기하적 템플릿 매칭(GTM)을 적용하면 원형 마크의 중심점을 추출하는 시간은 약 1msec에 불과하고 십자 마크의 경우는 약 16msec의 시간이 걸린다.



(a) When two marks are not overlapped.



(b) When two marks are overlapped.

그림 9. 정렬 마크의 중심점 추출 실험.

Fig. 9. Extraction of the centroids of alignment marks: CCD images (left) and the results (right).

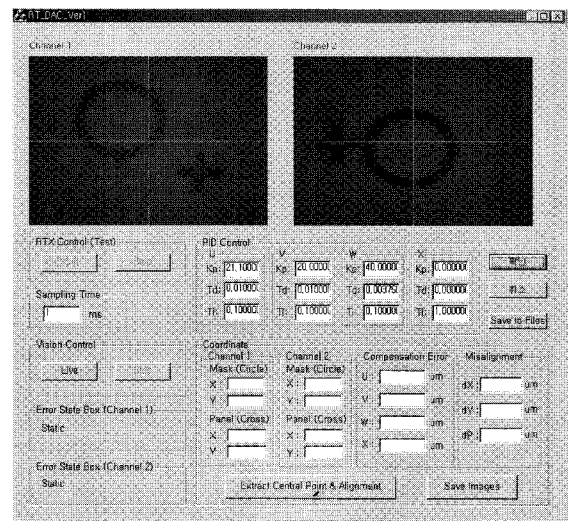


그림 10. 비전 정렬 시스템을 위한 GUI.

Fig. 10. Graphic user interface for visual alignment system.

한편, 동일한 조건에서 농담정규화상관법(NGC)[1]은 661 msec가 소요되었고 점상관법(PC)[3]은 197msec가 소요되었다. 따라서 본 논문의 GTM 방법이 비전 정렬 시스템 마크 인식에 매우 효과적임을 알 수 있다.

2. 비전 정렬 실험

앞 장에서 기술된 기구학적 해, 비전 알고리즘, 및 제어 알고리즘은 소프트웨어 함수들로 구현되었고 그림 10과 같은 GUI를 통해 통합적으로 운영되어 그림 3의 정렬 시스템에 적용되었다. 그림 8에서 비전 루프는 80msec의 샘플링 주기로 동작하도록 설정되었으며 조인트 제어 루프의 샘플링 주기는 1msec이다. 실험 과정에서 (15)의 상승시간  $t_r$ 은 0.1sec, 조인트 제어 종료시간  $t_f$ 는 0.5sec로 결정되었다.

그림 11은 초기에 주어진 마스크-패널 자세에 대한 비전 정렬 과정을 나타낸다. 한편, 작업 공간에서 정렬오차의 허용치(tolerance)는 CCD 센서의 분해능인  $10\ \mu\text{m}$ 이다. 초기 정렬 오차는  $(U, V, W) = (132.4, -592.6, -1367.6)\ \mu\text{m}$  이고 첫번째 비전 사이클 후에 정렬 오차가  $(U, V, W) = (-73.4, -3.5, 66.5)\ \mu\text{m}$ 로 감소하였으며 2차 정렬 후에는 각 축의 정렬 오차가 모두 허용치  $10\ \mu\text{m}$  이내로 수렴하였다. 정렬에 소요된 시간은 총 1.7 초이다. 1차 정렬 후에 비전으로 측정된 정렬 오차가 허용치를 벗어났기 때문에 2차 사이클이 작동되었으며 2차 정렬 후에는 모든 축의 정렬 오차가 허용치 이내로 수렴하여 마스크-패널 정렬이 종료되었다. 대부분의 실험에서 비전 사이클이 보통 2-4회 작동되었다.

한편, 그림 12는 2차 정렬 프로세스에서 각 조인트의 제어 오차를 나타낸다. 이 때 조인트 제어 루프에 대한 기준 명령은  $(U, V, W) = (-73.4, -3.5, 66.5)\ \mu\text{m}$ 로 극히 작은 값이다. 이와 같이 구동거리가 매우 작은 마이크로 제어 문제에서는 속도

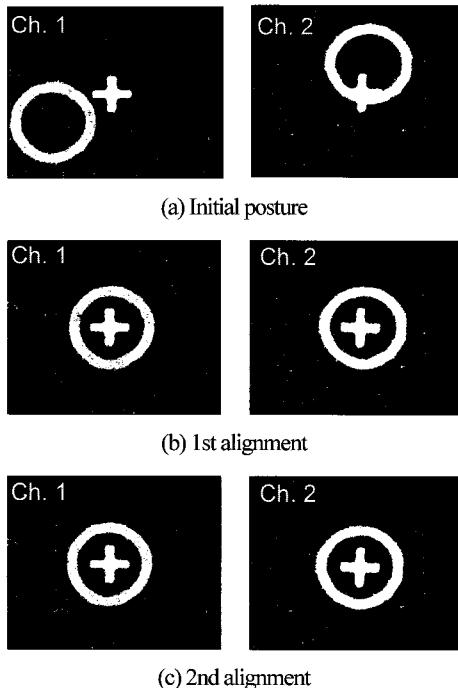


그림 11. 비전 정렬 실험 결과.  
Fig. 11. Visual alignment experiment.

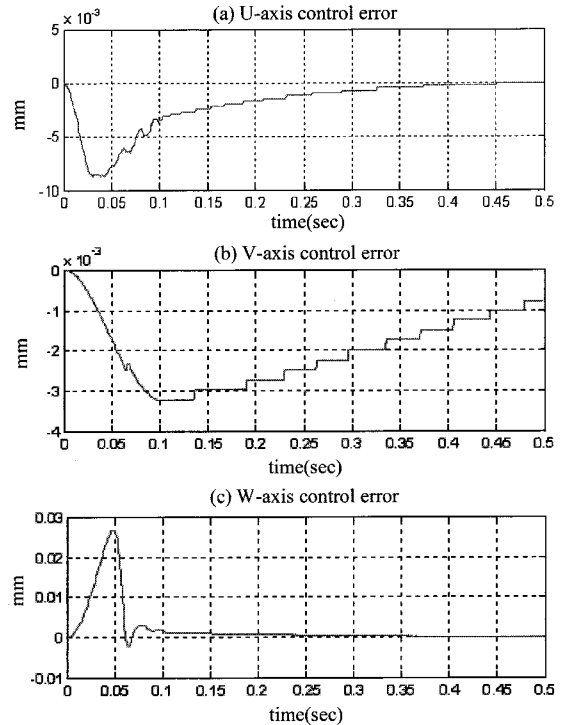


그림 12. 2차 정렬 프로세스에서의 조인트 제어 오차.  
Fig. 12. Joint control errors (encoder signal based) during the 2nd alignment.

가 충분히 증가하지 못하기 때문에 영(zero) 속도 부근의 비선형 마찰력이 정밀한 위치결정을 방해하는 주된 요인이 된다.

VII. 결론

평판 디스플레이 생산 공정에서 전공정 장비와 후공정 장비에 통합되는 비전 정렬 시스템의 성능과 신뢰성은 제품의 생산성 향상을 위한 핵심적인 고려 사항이며 생산 라인의 수율과도 직접적인 연관성이 있다. 이 논문에서는 일반적인 비전 정렬 시스템의 성능 향상을 위한 효율적인 비전 알고리즘과 정렬 스테이지의 제어문제를 다루었다. 먼저 4PPR 병렬형 스테이지의 역기구학 해를 구하였으며 다음에 얼라인 키를 고속으로 인식할 수 있는 기하적 템플릿 매칭 기법을 제안하였다. 또한, 제안된 알고리즘의 성능을 실험적으로 검증하였다.

한편, 주어진 하드웨어 환경에서 비전 정렬 시스템의 성능을 최대한 높이기 위해서는 비전 알고리즘과 스테이지 제어 알고리즘의 유기적 통합이 요구된다. 결론적으로 상용 비전 라이브러리와 상용 제어기 대신 본 논문에서 제안된 알고리즘과 기타 고려 사항들을 개발 대상이 되는 디스플레이 생산 장비의 비전 정렬 시스템에 적용한다면 보다 우수한 장비 개발이 가능할 것으로 기대된다.

참고문헌

[1] W. M. Silver, "Normalized correlation search in alignment, gauging, and inspection," *Proceedings of SPIE*. vol. 755, pp. 23-34, Jan. 1987.  
[2] S. Manickam, S. D. Roth, and T. Bushman, "Intelligent and optimal normalized correlation for high-speed pattern

- matching," *Datacube Technical Paper*, Datacube Inc., 2000.
- [3] W. Krattenthaler, K. J. Mayer, and M. Zeiller, "Point correlation: a reduced-cost template matching technique," *Proc. of the 1994 IEEE Int. Conf. on Image Processing*, pp. 208-212, 1994.
- [4] 강동중, 노태정, "고속 검사 자동화를 위한 예지 기반 점상관 알고리즘의 개발," 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제 9 권 제 8호, pp. 640-646, 2003. 8.
- [5] M. Gharavi-Alkhansari, "A fast globally optimal algorithm for template matching using low-resolution pruning," *IEEE Trans. on Image Processing*, vol. 10, no. 4, pp. 526-533, Apr. 2001.
- [6] S. Omachi and M. Onachi, "Fast template matching with polynomials," *IEEE Trans. on Image Processing*, vol. 16, no. 8, pp. 2139-2149, Aug. 2007.
- [7] H. T. Kim, C. S. Song, and H. J. Yang, "2-step algorithm of automatic alignment in wafer dicing process," *Microelectronics Reliability*, vol. 44, pp. 1165-1179, 2004.
- [8] S. H. Lai and M. Fang, "A hybrid image alignment system for fast and precise pattern localization," *Real-Time Imaging*, vol. 8, pp. 23-33, 2002.
- [9] B. R. Martin, "Self-alignment of patterned wafers using capillary forces at a wafer-air interface," *Advanced Functional Materials*, vol. 11, pp.381-386, 2001.
- [10] C. B. Umminger and C. G. Sodini, "An integrated analog sensor for automatic alignment," *IEEE Trans. on Solid-State Circuits*, vol. 30, pp. 1382-1390, 1995.
- [11] L. W. Tsai, *Robot Analysis: The mechanics of serial and parallel manipulators*, Wiley-Interscience, 1999.
- [12] R. C. Gonzalez and R. E. Wood, *Digital Image Processing*, Prentice Hall, 2002.
- [13] S. J. Kwon and W. K. Chung, "A discrete-time design and analysis of perturbation observer for motion control applications," *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol. 11, no. 3, pp. 399-407, May 2003.



### 권상주

1966년 5월 28일생(음). 1989년 서울대학교 조선공학과(공학사). 1991년 POSTECH(포항공대) 기계공학과(공학석사). 1991년 ~1997년 국방과학연구소 연구원. 2002년 POSTECH (포항공대) 기계공학과(공학박사). 2003년 한국과학기술연구원. 2004

년 한국생산기술연구원 선임연구원. 2004년 9월~현재 한국항공대학교 항공우주기계공학부 조교수. 관심분야는 강인제어 및 추정이론, 센서퓨전 기법, 비행로봇, 초정밀로봇, 휴머노이드.

### 박찬식

2005년 2월 한국항공대학교 항공우주기계공학부(공학사). 2007년 2월 한국항공대학교 항공우주기계공학부(공학석사). 2007년 2월~현재 삼성전자㈜ 디스플레이사업부. 관심분야는 머신 비전, 비주얼 얼라인먼트, 메카트로닉스.



### 이상무

1964년 12월 10일생. 1987년 서울대학교 제어계측공학과(공학사). 1989년 서울대학교 제어계측공학과(공학석사). 1999년 서울대학교 전기공학부(공학박사). 2005년~현재 한국생산기술연구원 로봇기술본부 수석연구원. 관심분야는 초정밀로

봇 제어, 모션제어, 위치인식.