정렬오차 추정 필터에 기반한 비전 정렬 시스템의 고속 정밀제어

Fast and Fine Control of a Visual Alignment Systems Based on the Misalignment Estimation Filter

정 해 민, 황 재 웅, 권 상 주*
(Haemin Jeong¹, Jaewoong Hwang², and SangJoo Kwon²)

¹STX Offshore & Shipbuilding Co.

²Korea Aerospace University

Abstract: In the flat panel display and semiconductor industries, the visual alignment system is considered as a core technology which determines the productivity of a manufacturing line. It consists of the vision system to extract the centroids of alignment marks and the stage control system to compensate the alignment error. In this paper, we develop a Kalman filter algorithm to estimate the alignment mark postures and propose a coarse-fine alignment control method which utilizes both original fine images and reduced coarse ones in the visual feedback. The error compensation trajectory for the distributed joint servos of the alignment stage is generated in terms of the inverse kinematic solution for the misalignment in task space. In constructing the estimation algorithm, the equation of motion for the alignment marks is given by using the forward kinematics of alignment stage. Secondly, the measurements for the alignment mark centroids are obtained from the reduced images by applying the geometric template matching. As a result, the proposed Kalman filter based coarse-fine alignment control method enables a considerable reduction of alignment time.

Keywords: flat display industry, visual alignment robot, pyramid image, coarse-fine control, alignment mark

I. 서론

평판 디스플레이 제품이 갈수록 대면적화, 고집적화, 초정밀화되면서 생산 장비 분야에서도 이러한 경향을 뒷받침할 수 있는 새로운 기술 개발이 요구되고 있다. 하나의 디스플레이 제품이 완성되기까지는 여러 단계의 공정을 거쳐야 하는데, 각 공정을 수행하기 위해서는 패턴 마스크와 글라스 패널을 상호 정렬시키는 비전 정렬(visual alignment) 과정이 이루어져야 한다. 사실 이러한 비전 정렬 기술은 디스플레이 생산 라인의 생산성과 제품의 품질을 결정하는 핵심적인 기술 중의 하나이다[1,2].

비전 정렬 시스템에서는 비전 센서를 통하여 평면 상에서 마스크-패널 간의 정렬오차를 측정하고, 작업 공간에서 x, y, θ 방향에 대하여 3자유도 운동성을 갖는 위치 결정 스테이지(positioning stage)를 이용하여 정렬오차를 보정한다. 따라서 비전 정렬 시스템의 성능을 향상시키기 위해서는 마스크-패널 간 정렬오차를 실시간으로 갱신(update)할 수 있는 영상처리 알고리즘과 정렬오차를 고속으로 보정할 수 있는 정밀 제어 알고리즘이 요구된다.

특정 입력 영상으로부터 얼라인 마크들을 분리하고 각 마크의 중심점을 측정하기 위해서는 보통 패턴 매칭 기법을 적용한다[3,4]. 현재 디스플레이 생산 공정에서 운용되고 있는 비전 정렬 시스템들은 대부분 상용 비전 라이브러리를 기반

으로 하고 있다. 이러한 일반적인 비전 알고리즘들은 인식 대상 객체의 다양한 형상, 조명 조건의 변화 등에 대하여 일정한 수준의 성능을 보이는 반면, 영상처리 시간 측면에서는 매우 비효율적이다. 따라서 이 논문에서는 얼라인 마크 인식 시간을 크게 감소시킬 수 있는 기하적 템플릿 매칭(geometric template matching) 기법[1,5]을 바탕으로 비전 정렬 시스템에 대한 고속 정밀제어 알고리즘을 개발한다. 기하적 템플릿 매칭은 얼라인 마크가 원과 십자 모양 등과 같이 비교적 단순하다는 점에 착안하여 마크의 형상을 대표할 수 있는 특징점들(feature points)의 집합을 기하적 템플릿으로 정의한 후, 이들을 원 영상과 직접 매칭시키는 방법으로서 기존의 일반적인 매칭 방법보다 훨씬 빠른 인식 성능을 보인다.

한편, 정렬오차를 보상하는 제어 동작 과정에서 정밀 스테이지는 일반적으로 look-then-move 방식으로 구동된다. 즉, 비전 시스템을 통한 정렬오차 추출 과정과 정렬 스테이지를 이용한 보정 과정이 순환적으로 이루어지며, 마스크-패널 간 정렬오차가 허용오차(tolerance) 이내로 수렴될 때까지 이 과정이 반복된다. 각 얼라인 마크를 인식하는데 걸리는 시간이 보통 수백 msec에 이르기 때문에 이러한 비전 정렬 방식은 불가피한 측면이 있다. 그러나 위치 결정 스테이지의 각 구동 조인트가 제어 동작을 멈추었다 다시 시작하면 stick-slip 현상에 의한 저크(jerk) 동작이 발생하기 때문에 look-then-move 방식에서는 일관성 있는 비전 정렬 성능을 기대하기가 힘들다.

따라서 이 논문에서는 원 영상을 일정한 비율로 축소한 영상을 이용하여 마크 위치 정보에 대한 갱신 주기를 단축함으로써 기존 look-then-move 정렬 방법의 단점을 보완할 수 있는 새로운 정렬 제어 방법을 제안한다. 또한 원 영상에 비하여 감소된 축소 영상의 픽셀 분해능(pixel resolution)때문에 발생

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2010. 3. 22., 수정: 2010. 5. 3., 채택확정: 2010. 8. 7.

정해민: (주)STX조선해양 연구소(seamanjihm@hotmail.com)

황재웅, 권상주: 한국항공대학교 항공우주기계공학부

(bluelead@naver.com/sjkwon@kau.ac.kr)

※ 이 논문은 2009 한국연구재단 일반연구지원사업(기본연구)의 지원을 받아 수행된 연구임(2009-0077203).

하는 마크 중심점 측정 오차를 보상하기 위하여 칼만 필터에 기반한 추정 알고리즘을 설계한다. 제안된 비전 정렬 제어 시스템은 기존 방식에 의거한 파인 비전 루프(fine vision loop)와 정렬오차 추정 필터에 의해 빠른 주기로 정렬오차가 갱신되는 내부의 코스 비전 루프(coarse vision loop)로 이루어진다.

이 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 먼저 II 장에서는 비전 정렬 시스템의 구성과 절차에 대하여 설명한다. III 장에서는 정렬오차를 실시간으로 추정하기 위한 칼만 필터를 설계하고, 이를 기반으로 IV 장에서는 코스-파인 정렬 제어 기법을 제안한다. V 장에서는 실험 결과를 통하여 제안된 방법의 성능을 검증하고 마지막으로 VI 장에서 결론을 맺는다.

II. 비전 정렬 시스템의 구성 및 절차

비전 정렬 시스템은 크게 비전 시스템과 제어 시스템으로 구성되어 있으며 그림 1은 전체적인 비전 정렬 과정을 나타낸다. 우선 핸들링 로봇에 의하여 글라스 패널이 장비 안으로 이동하면 패널과 마스크에 인쇄되어 있는 얼라인 마크들이 비전 센서의 인식 영역 안에 들어올 수 있도록 전정렬(pre-alignment) 과정이 수행된다. 다음에 CCD 센서에 의해 획득한 영상에 영상처리 알고리즘을 적용함으로써 각 얼라인 마크의 중심점을 추출한다. 다음에 마크의 중심점 좌표들을 이용하여 마스크-패널 정렬오차가 계산되며 정밀 스테이지에 의한 오차 보상이 이루어진다.

한편 정렬 제어 과정에서 글라스 패널은 고정된 상태를 유지하며 패턴 마스크는 정밀 스테이지의 말단부와 연결되어 평면 3자유도 운동을 한다. 정렬오차가 허용 오차(tolerance) 범위 내로 수렴할 때까지 비전 인식과 오차 보상 제어가 반복 실행되며, 마스크-패널 정렬이 종료된 후에는 생산 장비의 종류에 따라 증착, 프린팅, 리소그래피와 같은 본 공정이 뒤따른다.

그림 2는 look-then-move 방식의 비전 정렬 과정을 순서대로 나타낸 것이다. 패턴 매칭 기법을 적용하여 비전 센서에 의해 획득된 영상으로부터 각 얼라인 마크의 중심점을 추출하기 위해서는 먼저 이진화 과정과 노이즈 필터링 과정을 거친다. 작업 공간에서 결정된 평면 정렬오차(in-plane alignment error)는 위치결정 스테이지에 대한 역기구학 해를 이용하여

그림 2. Look-then-move 방식 비전 정렬 시스템 순서도.

Fig. 2. Flow chart of look-then-move visual alignment system.

각 구동 축의 이동 거리로 분해되며, 조인트 제어를 통해 보상된다. 본 논문에서 실험에 사용된 3PPR 병렬형 스테이지의 기구학 해석과 관련된 자세한 내용은 참고문헌[1,2]에 기술되어 있다.

III. 정렬오차 실시간 추정 필터 설계

기존의 마스크-패널 정렬 방법에서는 비전 센서에서 획득한 원 영상(raw image)에서 각 마크의 중심점을 추출하기까지 많은 시간이 소모되기 때문에 실시간으로 정렬오차를 갱신하는 것은 사실상 불가능하다. 한편, 원 영상을 일정 비율로 축소하면 영상으로부터 중심점을 추출하면 계산 시간은 단축할 수 있으나 영상 축소 과정에서 발생하는 픽셀 분해능의 감소 때문에 그만큼 측정 오차가 증가한다.

본 절에서는 얼라인 마크에 대한 운동 방정식과 축소 영상에서 결정된 위치 측정치를 칼만 필터[6] 알고리즘을 통하여 융합함으로써 정렬오차를 실시간으로 추정할 수 있는 알고리즘을 설계한다. 영상처리 분야에서 칼만 필터를 적용한 결과들을 살펴보면[7,8] 보통 연산 속도를 증가시키기 위해서 데이터 축소 기법(data pruning)을 병행한다. 본 논문에서는 축소 영상에 기하적 템플릿 매칭 기법[1]을 적용함으로써 영상 획득 장치(frame grabber)의 샘플링 속도와 유사한 주기로 마크 위치를 갱신하고자 한다.

1. 정렬오차 산출

그림 3은 마스크와 패널 각각에 인쇄된 마크의 중심점 좌표들과 정렬오차 사이의 관계를 나타낸다. 그림에서 CCD영상에서 추출된 두 원형 마크(마스크)의 중심점을 연결한 선의 중심 좌표 $P_c(p_x, p_y)$ 와 두 십자 마크(패널)의 중심점을 연결한 선의 중심 좌표 $M_c(m_x, m_y)$ 는 각각 다음과 같다.

$$p_x = \frac{x_{c1} + x_{c2}}{2}, \quad p_y = \frac{y_{c1} + y_{c2}}{2} \quad (1a)$$

$$m_x = \frac{x_{l1} + x_{l2}}{2}, \quad m_y = \frac{y_{l1} + y_{l2}}{2} \quad (1b)$$

그림 1. 마스크-패널 비전 정렬 과정.

Fig. 1. Mask-panel visual alignment process.

그림 3. 마크 중심점 위치와 마스크-패널 평면 정렬오차.
Fig. 3. In-plane misalignment between mask and panel.

결과적으로 평면 상에서 마스크-패널 정렬오차는 다음 식으로 주어진다.

$$\Delta x = p_x - m_x = \frac{x_{C1} + x_{C2} - (x_{L1} + x_{L2})}{2} \quad (2)$$

$$\Delta y = p_y - m_y = \frac{y_{C1} + y_{C2} - (y_{L1} + y_{L2})}{2} \quad (3)$$

$$\Delta\phi = \tan^{-1}\left(\frac{y_{L2} - y_{L1}}{x_{L2} - x_{L1}}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{y_{C2} - y_{C1}}{x_{C2} - x_{C1}}\right) \quad (4)$$

2. 얼라인 마크의 운동 방정식

위치결정 스테이지와 함께 움직이는 마크 위치를 추정하기 위해서는 먼저 마크에 대한 운동 방정식이 주어져야 한다. 위치와 속도 사이의 기구학적 관계식 $\dot{x} = v$ 를 이용하면 이 산시간 영역에서 마크 중심점의 운동 방정식이 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{x}(k) = \mathbf{F}(k-1)\mathbf{x}(k-1) + T_c \mathbf{v}(k-1) + \mathbf{w}(k-1)$$

$$\text{where } \mathbf{x}(k) = \begin{bmatrix} x(k) \\ y(k) \end{bmatrix}, \mathbf{v}(k) = \begin{bmatrix} v_x(k) \\ v_y(k) \end{bmatrix}, \mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 $\mathbf{x}(k)$ 는 마크 중심점의 좌표, $\mathbf{v}(k)$ 는 마크 중심점의 이동 속도, T_c 는 속도 갱신 주기를 나타낸다. 또한 $\mathbf{w}(k) \sim N(0, \mathbf{Q})$ 는 시스템 노이즈로서 칼만 필터에서는 백색 잡음(white noise)으로 가정한다.

한편 (5)식에서 입력에 해당하는 마크의 이동 속도를 계산하기 위해서는 정렬 스테이지에 대한 정기구학식이 필요하다. 만일 그림 4와 같이 3PPR 병렬형 스테이지의 조인트 위치가 주어진다면 이에 대한 역기구학식은 다음과 같다[1].

$$\begin{bmatrix} U_x \\ V_y \\ W_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x + b \cos(\Delta\phi) + a \sin(\Delta\phi) \\ \Delta y + b \cos(\Delta\phi) + a \sin(\Delta\phi) \\ -\Delta x + b \cos(\Delta\phi) + a \sin(\Delta\phi) \end{bmatrix} \quad (6)$$

그림 4에서 $(\Delta x, \Delta y)$ 는 작업 공간 상에서 병진운동 방향의 정렬오차, $\Delta\phi = \phi_p - \phi_M$ 는 회전운동 방향의 정렬오차, (U_x, V_y, W_x) 는 정렬오차를 보상하기 위한 각 구동 축의 이동

그림 4. 얼라인 마크의 위치, 3PPR 스테이지 구동 조인트들의 정렬오차 보상거리.
Fig. 4. Joint displacements for the misalignment compensation.

거리, (ϕ_p, ϕ_M) 은 각각 절대좌표계에 대한 패널과 마스크의 회전각을 의미한다. (6)식을 시간에 대하여 미분한 후 행렬식으로 정리하면 다음과 같이 각 구동 축의 속도와 위치결정 스테이지의 말단부(이동 플랫폼) 속도 사이의 선형 관계를 나타내는 자코비안 행렬을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_x \\ \dot{V}_y \\ \dot{W}_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -b \sin(\Delta\phi) + a \cos(\Delta\phi) \\ 0 & 1 & -b \sin(\Delta\phi) + a \cos(\Delta\phi) \\ -1 & 0 & -b \sin(\Delta\phi) + a \cos(\Delta\phi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\Leftrightarrow \dot{q}(t) = J(t)\dot{p}(t)$$

병렬형 메커니즘의 경우, 일반적으로 직렬형 메커니즘에 비해 위치 차원에서 닫힌 형태(closed form)의 정기구학 식을 구하기가 어렵다. 그러나 위 (7)식에서 정의한 자코비안의 역행렬을 취함으로써 다음과 같이 3PPR 병렬형 스테이지에 대한 속도 차원에서의 정기구학 식을 결정할 수 있다.

$$\dot{p}(t) = J^{-1}(t)\dot{q}(t) \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & -0.5 \\ -0.5 & 1 & -0.5 \\ 1/(2m) & 0 & 1/(2m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_x \\ \dot{V}_y \\ \dot{W}_x \end{bmatrix} \quad (8)$$

where $m = b \sin \theta - a \cos \theta$

따라서 각 구동 축의 속도를 모터 엔코더 신호를 이용하여 계산한 후, 위 (8)식에 대입함으로써 정렬 스테이지 이동 플랫폼의 속도를 실시간으로 결정할 수 있다. 그림 4에서 스테이지의 좌표계 중심으로부터 임의의 마크 중심점까지의 거리를 $\bar{r}$ 이라고 하면 각 얼라인 마크의 이동 속도는 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{v}(k) = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_\phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x} - \bar{r}_y \dot{\phi} \\ \dot{y} + \bar{r}_x \dot{\phi} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} \quad (9)$$

결국 (5), (8), (9)식을 함께 이용함으로써 각 얼라인 마크 중심점의 위치를 구동 조인트의 엔코더 신호 주기에 맞추어 실시간으로 갱신할 수 있다.

3. 기하적 템플릿 매칭(GTM)을 이용한 마크 위치 측정

비전정렬 시스템은 정형화된 환경 하에서 조명 변화가 심하지 않고 얼라인 마크의 형상이 매우 단순하다는 특징이 있다. 이러한 사실을 고려하여 비전 정렬 시스템에 특화된 알고리즘으로서 기하적 템플릿 매칭 방법이 제안되었다[1,5]. 기하적 템플릿 매칭에서는 그림 5와 같이 매칭 영역 안에 존

그림 5. 얼라인 마크에 대한 기하적 템플릿 매칭.
Fig. 5. Geometric template matching for alignment marks.

재하는 모든 픽셀 좌표에 대하여 주변 특징점들에 대한 매칭을 순차적으로 수행한다. 예를 들어, 원 마크(마스크)에 대해서는 주변 8개의 특징점을 매칭하고, 십자 마크(패널)에 대해서는 주변 13개의 특징점을 매칭함으로써 각 마크의 중심점 좌표를 추출한다. 특히 십자 마크는 임의의 자세를 가질 수 있으므로 매 픽셀 마다 템플릿을 0에서 90도까지 회전시키면서 중심점을 찾는다.

본 논문에서 사용된 CCD 카메라는 30 fps의 속도로 1280 x 960 크기의 영상을 획득한다. 중심점 추정을 위한 칼만 필터에서는 원 영상을 1/16로 축소한 320 x 240크기의 영상에 대하여 템플릿 매칭을 수행한다. 축소 영상의 경우, 얼라인 마크의 중심점 추출 시간은 30 fps 프레임 그래버의 영상 갱신 주기인 33.3 msec 보다 항상 작았다. 그러나 약간의 시간 여유를 고려하여 중심점 측정치의 입력 주기를 40 msec로 결정하였다.

칼만 필터의 순환 알고리즘을 구성하기 위해서는 또한 추정 상태변수에 대한 측정 방식이 요구된다. 기하적 템플릿 매칭에서는 입력 영상으로부터 마크 중심점 좌표를 직접 추출하므로 각 마크의 측정 방식은 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{z}(k) = \mathbf{H}\mathbf{x}(k) + \mathbf{n}(k), \text{ with } \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

단, $\mathbf{n}(k) \sim N(0, \mathbf{R})$ 는 측정 노이즈로서 영-평균 백색 잡음(white noise)으로 가정한다.

보통 평면 상에서의 비전 정렬을 위해서는 마스크와 패널에 각각 2개 이상의 얼라인 마크와 2대 이상의 카메라가 요구된다. (5), (10)식은 임의의 얼라인 마크 중심점에 대한 운동 모델과 측정 모델로서 마크의 수에 따라서 벡터와 행렬의 사이즈는 그만큼 증가한다.

4. 마크 중심점 추정을 위한 이산 칼만 필터

앞 절에서 유도한 얼라인 마크의 운동 모델과 측정 모델을 이용하면 그림 6과 같은 칼만 필터의 순환 알고리즘을 구성할 수 있다. 선추정치(prior estimates)는 (1)식에서 정의한 마크 중심점의 운동 방정식을 이용하여 1 msec 주기로 산출되며,

그림 6. 마크 중심점 추정을 위한 칼만 필터 순환 알고리즘.
Fig. 6. Recursion of the Kalman filter algorithm.

후추정치(posterior estimates)는 축소 영상에서 측정되는 중심점 갱신 주기에 해당하는 40 msec 마다 산출된다. 최종적으로 (2)-(4)식에 후추정치를 대입하면 정렬오차를 실시간으로 갱신할 수 있으며 다음 절에서 제시되는 코스-파인 정렬 기법에 활용할 수 있다. 한편, 칼만 필터 알고리즘의 성능은 시스템 잡음과 측정 잡음에 대한 공분산(covariance) 행렬($\mathbf{Q}, \mathbf{R}$)을 적절히 조절함으로써 최적화시킬 수 있다.

IV. 오차 추정 필터에 기반한 비전 정렬 기법

1. 코스-파인(coarse-fine) 비주얼 서보

그림 2와 같은 순서도를 따라 look-then-move 방식으로 구동되는 기존의 비전 정렬 시스템에서는 영상처리 시간 동안에는 정렬 스테이지의 제어 동작이 멈추게 된다. 이때 각 구동 조인트에는 제어 동작 전후에 불연속적인 마찰력이 발생하여 저크(jerk) 현상을 유발한다. 한편, 정렬이 완료될 때까지 각 구동 축이 움직이는 범위는 불과 수십 ~ 수백 μm 에 불과하기 때문에 이러한 마찰력은 정밀한 위치 제어를 방해한다. 또한 기존의 정렬 방법에서는 영상 정보가 갱신되는 속도가 일반적인 비주얼 서보에 비하여 매우 느리기 때문에 오차 수렴 시간을 단축에 근본적인 한계가 있다.

이러한 단점을 극복하기 위하여 본 논문에서는 앞 절에서 제시한 얼라인 마크 위치추정 필터를 기반으로 하여 그림 7과 같이 코스-파인 비전 루프를 갖는 정렬 제어 시스템을 제안한다. 제안된 제어기는 원 영상을 이용하여 중심점을 추출하는 외부 비전 루프와 축소 영상과 추정 필터에 의해 정렬 오차를 갱신하는 내부 루프로 구성된다. 그림 7에서 외부 루프는 기존의 정렬 방법과 같이 look-then-move 방식으로 동작한다. 그러나 내부 루프는 일정한 샘플링 주기 아래 비전 인식과 보상 제어가 동시에 이루어지는 look-and-move 제어 동작을 한다. 기존 방법에서는 주어진 정렬오차에 대하여 조인트 제어를 수행할 때 내부 센서(엔코더)에만 의존하기 때문에 고정 좌표계에 대한 절대 오차의 누적을 피할 수 없다. 그러나 제안된 방법은 조인트 제어 과정에 영상 정보를 함께 이용함으로써 제어 정밀도를 보다 향상시킬 수 있다는 장점을 갖는다.

그림 7. 정렬오차 추정 필터에 기반한 비전 정렬 시스템.

Fig. 7. Misalignment estimation filter based visual alignment system.

본 논문에서 제시한 코스-파인 비주얼 서보(coarse-fine visual servo)에서는 칼만 필터 출력 값을 이용하여 오차보상 거리에 대한 갱신 주기를 상대적으로 단축할 수 있으므로 따라서 그림 8(b)와 같이 조인트 제어 기준 궤적을 일정한 주기로 갱신할 수 있다. 그림에서 U_0 는 초기 정렬오차에 대응하는 임의의 구동 축의 이동 거리, U_1 는 1차 정렬 후의 오차 보상 거리를 나타낸다. 또한 δ_1 과 δ_2 는 칼만 필터링 루프를 통하여 산출된 정렬오차에 대응되는 조인트 오차 보상 거리이다. 그림에 표현한 것과 같이 칼만 필터 출력 주기마다 기준 궤적을 변경할 필요는 없으며, 실험을 통하여 최적의 궤적 갱신 주기를 결정하는 것이 바람직하다.

2. 정렬오차 보상을 위한 기준 궤적 생성

기존의 look-then-move 정렬 방식을 따를 경우, 각 구동 조인트에 인가되는 초기 오차보상 거리(U_0)에 대하여, 예를 들어 그림 8(a)과 같이 3차 다항식 형태의 기준 궤적을 적용함으로써 조인트 제어를 수행할 수 있다. 이 때 1차 정렬이 종료된 후의 정렬 오차가 허용오차(tolerance) 범위를 벗어난다면 2차 정렬을 위한 오차보상 거리(U_1)가 결정되고 위 과정이 반복된다.

그림 8. 정렬오차 보상을 위한 기준 궤적. t_r : rise time, t_s : settling time, t_k , t_m : coarse-vision loop의 1, 2차 정렬 종료 시간.

Fig. 8. Joint reference trajectory for the misalignment compensation.

그림 9. 얼라인 마크 인식을 위한 템플릿 매칭 영역 설정.

Fig. 9. Template matching area for the alignment mark recognition.

반면에 제안된 코스-파인 비주얼 서보(coarse-fine visual servo)에서는 칼만 필터 출력 값을 이용하여 오차보상 거리에 대한 갱신 주기를 상대적으로 단축할 수 있으므로 따라서 그림 8(b)와 같이 조인트 제어 기준 궤적을 일정한 주기로 갱신할 수 있다. 그림에서 U_0 는 초기 정렬오차에 대응하는 임의의 구동 축의 이동 거리, U_1 는 1차 정렬 후의 오차 보상 거리를 나타낸다. 또한 δ_1 과 δ_2 는 칼만 필터링 루프를 통하여 산출된 정렬오차에 대응되는 조인트 오차 보상 거리이다. 그림에 표현한 것과 같이 칼만 필터 출력 주기마다 기준 궤적을 변경할 필요는 없으며, 실험을 통하여 최적의 궤적 갱신 주기를 결정하는 것이 바람직하다.

본 논문에서 실험에 사용된 CCD 카메라의 영상획득 주기는 30 fps로서 하나의 영상을 얻는데 33ms가 소요된다. 코스-파인 비주얼 서보의 성능을 높이기 위해서는 예를 들어 100 fps의 카메라를 사용한다면 영상획득 시간이 10 msec로 단축된다. 그러나 고속 매칭 기법으로서 기하적 템플릿 매칭을 적용하는 경우에도 영상처리 시간의 한계 때문에 320 x 240 픽셀의 영상에 대하여 60 fps 이상의 영상 획득은 큰 의미가 없다. 한편, 초기 정렬 과정에서 칼만 필터에 의해 추출되는 마크 중심점 정보를 이용하면 두 번째 이후의 정렬 과정에서는 그림 9와 같이 템플릿 매칭 영역을 제한하여 영상처리 시간을 단축할 수 있다.

V. 실험 결과

그림 10은 비전 정렬 실험 장치로서 두 대의 CCD 카메라와 3축 병렬형 위치결정 스테이지로 구성되어 있다. 본 논문에서 제안한 정렬 제어 방법의 효과를 검증하기 위하여 비교 실험을 수행하였다. 마스크-패널 정렬을 종료시키기 위한 허용오차는 원 영상(1280 x 960)이 가지는 픽셀 분해능(resolution)의 두 배에 해당하는 10 μ m이다. 칼만 필터링에 사용되는 축소 영상(320 x 240)은 획득 영상의 가로, 세로 픽셀 수를 1/4의 비율로 일정하게 축소하여 원 영상의 1/16의 크기를 갖는다. 이는 30 fps 프레임그래버를 사용할 경우, 기하적 매칭을 적용할 수 있는 최적의 사이즈에 해당된다.

칼만 필터의 출력 주기는 축소 영상에 대한 템플릿 매칭 시간을 고려하여 40ms로 정하였다. 한편, 칼만 필터의 성능을 최적화하기 위해 축소 영상의 픽셀 분해능(20 μ m) 값을 대각 성분으로 갖도록 측정 잡음 공분산(R)을 고정시키고 시스템 잡음 공분산(Q) 값을 조정하였다. 최종적으로 본 실험

그림 10. 비전 정렬 실험 장치.

Fig. 10. Experimental setup for visual alignment.

(a) Standard method (conventional).

(b) Coarse-fine method (proposed).

그림 11. 정렬 방법에 따른 오차 수렴 시간 비교(U-axis).

Fig. 11. Comparison of the error convergence time.

에서 적용된 공분산 값들은 다음과 같다.

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.02 & 0 \\ 0 & 0.02 \end{bmatrix} (mm) \quad (11)$$

그림 11은 그림 8(a)의 오차보상 궤적 및 파인 영상만을 이용한 기존의 정렬 방식과 그림 8(b)의 궤적을 이용하는 코스-파인 비주얼 서보 방식을 서로 비교한 실험결과이다. 실선은 정렬 스테이지 U-축의 동작을 나타내며 별(*) 마크들은 추정 필터의 출력 주기마다 갱신되는 오차 보상 거리를 의미한다. 두 번째 정렬 이후에 파인 비전 루프의 영상처리 시간이 감소하는 것은 그림 9와 같이 마크의 존재 영역을 재설정 후 템플릿 매칭을 적용할 수 있기 때문이다. 그림 11은 기존 방법은 3회의 look-then-move 동작 후에 정렬을 완료한 반면에 제안된 방법은 2회 만에 완료함으로써 오차 수렴 시간이 개선된다는 것을 보여준다.

그림 12. 정렬오차 분포의 수렴 과정(30회 반복 실험).

Fig. 12. Convergence of the misalignment distribution.

그림 13. 파인 비전 루프의 반복 횟수 히스토그램.

Fig. 13. Histogram of the number of fine vision loop activations.

표 1. 정렬오차의 표준편차(1σ) 비교 (um).

Table 1. Comparison of the standard deviation of misalignment.

	Fine-vision loop	SD(x-axis)	SD(y-axis)
Standard (기존 방법)	initial	230.6	370.2
	1st	71.5	121.4
	2nd	24.1	40.1
	3rd	12.0	17.2
Observer-based (제안된 방법)	initial	253.0	389.6
	1st	12.0	38.9
	2nd	8.1	13.0
	3rd	5.2	6.3

표 2. 파인 비전 루프의 반복 횟수 비교.

Table 2. The number of fine vision loop activations.

	mean	Standard deviation
Standard (기존 방법)	3.8	1.1567
Observer-based (제안된 방법)	2.2667	0.6915

그림 12는 위 두 가지 정렬 방법에 대하여 각각 30회씩 반복 실험한 결과이다. 그림에서 ‘standard’는 기존의 정렬 방법, ‘observer-based’는 칼만 필터에 기반한 새로운 정렬 방법을 의미한다. 그림 12(a)는 초기 정렬오차로서 서로 균등한 분포 조건임을 알 수 있다. 그림 12(b)-(d)는 파인 비전 루프의 순환과 함께 각각 첫 번째, 두 번째, 세 번째 정렬 동작을 마친 후의 정렬오차 분포를 나타낸다. 각 변은 x, y 방향의 정렬오차 ($\Delta x, \Delta y$)이며 회전방향 오차 ($\Delta \phi$)는 별도로 표시하지 않았다. 각 그림에 표시한 타원은 모든 방향에 대한 정렬오차의 3σ (3-sigma) 표준편차를 나타낸다.

그림 12(a)-(d)는 초기 정렬오차로부터 look-then-move 동작의 반복과 함께 정렬오차가 허용오차 범위 안으로 수렴하는 과정을 나타낸다. 결과에서 알 수 있듯이 본 논문에서 제안된 코스-파인 정렬 방법을 적용할 경우, 오차의 수렴 속도가 크게 증가한다는 것을 알 수 있다. 표 1은 그림 11의 실험 결과에서 파인 비전 루프의 반복 횟수에 따른 x, y 방향 정렬오차의 표준편차를 정리한 것이다.

그림 13은 상기 두 가지 정렬 방법에 대한 30회 실험에서 파인 비전 루프가 반복된 횟수를 나타내는 히스토그램이다.

그리고 표 2는 파인 비전 루프 반복 횟수의 평균과 표준편차를 서로 비교한다. 결론적으로 칼만 필터에 기반한 코스-파인 정렬 방법은 기존 방법에 비해 반복 정렬 횟수를 평균 40% 정도 감소시키며, 이에 따라 전체 비전 정렬 시간을 크게 단축시킬 수 있다. 또한 평균 정렬 횟수에 대한 표준편차를 감소시킴으로써 보다 일관성 있는 비전 정렬 성능을 기대할 수 있다.

VI. 결론

이 논문에서는 기존의 look-then-move 방식 파인 비전(원 영상) 루프에 얼라인 오차 추정 필터에 기반한 코스 비전(축소 영상) 루프를 추가하는 코스-파인 비전 정렬 제어 기법을 제안하였다. 먼저 얼라인 마크에 대한 운동 방정식과 축소 영상에 대한 마크 중심점 측정치를 융합하여 마스크-패널 간 정렬오차를 실시간으로 갱신할 수 칼만 필터를 설계하였다. 또한 비전 데이터로부터 얼라인 마크의 중심점을 추출하기 위해서 고속 매칭이 가능한 기하적 템플릿 매칭 기법을 적용하였다. 본 논문에서 제안된 정렬 방법은 기존에 비하여 얼라인 마크의 중심점을 보다 빠르고 정확하게 추출할 수 있으며, 전체적으로 비전 정렬 시스템의 성능을 한 단계 업그레이드할 수 있음을 실험 결과들을 통해 확인하였다.

향후 비전 정렬 시스템의 성능 개선을 위해서는 조명 변화에 대하여 신뢰성 높은 마크 인식 알고리즘, 얼라인 스테이지 각 구동 축에 대한 마찰력 보상 기법, 마스크와 패널의 수직 접합 공정을 고려한 3차원 비전 정렬 기법 등을 개발해야 한다. 비전정렬 기술은 디스플레이 산업뿐만 아니라 반도체, 항공우주 등 여러 분야에 파급 효과가 매우 큰 분야로서 향후에도 지속적인 연구가 필요하다.

참고문헌

- [1] S. J. Kwon, C. Park, and S. M. Lee, “Kinematics and control of a visual alignment system for flat panel displays,” *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 14, no. 4, Apr., pp. 369-375, 2008.
- [2] H. Jeong, S. J. Kwon, and S. M. Lee, “Mask-panel alignment robot system using a parallel mechanism with actuation redundancy,” *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 15, no. 9, pp. 887-893, 2009.
- [3] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Digital Image Processing*, Prentice-Hall, 2002.
- [4] E. Gose, R. Johnsonbaugh, and S. Jost, *Pattern Recognition and Image Analysis*, Prentice-Hall, 1996.
- [5] C. S. Park and S. J. Kwon, “An efficient vision algorithm for fast and fine mask-panel alignment,” *Proc. of 2006 SICE-ICASE International Joint Conference (SICE-ICCAS 2006)*, pp. 1461-1465, Oct. 2006.
- [6] M. S. Grewal and A. P. Andrews, *Kalman Filtering: Theory and Practice Using Matlab*, Wiley Inter-science, 2001.
- [7] R. Qian, M. Sezan, and K. Matthews, “A robust real-time face tracking algorithm,” *Proc. IEEE ICIP*, vol. 1, pp. 131-135, Oct. 1998.
- [8] D. S. Jang, S. W. Jang, and H. I. Choi, “2-D human body tracking with structural kalman filter,” *Pattern Recognition*, vol. 35, pp. 2041-2049, 2002.

- [9] J. Wang, H. Zha, and R. Cipolla, "Coarse-to-fine vision-based localization by indexing scale-Invariant features," *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics*, vol. 36, no. 2, pp. 413-422, Apr. 2006.
- [10] L. Ren, L. Wang, J. K. Mills, and D. Sun, "Vision-based 2-D automatic micrograsping using coarse-to-fine grasping strategy," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 9, pp. 3324-3331, Sep. 2008.
- [11] S. J. Ralis, B. Vikramaditya, and B. J. Nelson, "Micropositioning of a weakly calibrated microassembly system using coarse-to-fine visual servoing strategies," *IEEE Trans. on Electronics Packaging and Manufacturing*, vol. 23, no. 2, pp. 123-131, Apr. 2000.

정 해 민

2007년 2월 한국항공대학교 항공우주 기계공학부(공학사). 2009년 2월 한국항공대학교 항공우주기계공학부(공학석사). 2009년 2월~현재 STX 조선해양연구소. 관심분야는 머신 비전, 로봇제어, 메카트로닉스.

황 재 응

2009년 2월 한국항공대학교 항공우주기계공학부(공학사). 2009년 3월~현재 한국항공대학교 항공우주기계공학부 석사과정. 관심분야는 정밀 메커니즘 설계, 비전기반 로봇제어.

권 상 주

1989년 서울대학교 조선공학과(공학사). 1991년 POSTECH 기계공학과(공학석사). 2002년 POSTECH 기계공학과(공학박사). 1991년~1997년 국방과학연구소 연구원. 2003년~2004년 한국과학기술연구원, 한국생산기술연구원 선임연구원. 2004년 9월~현재 한국항공대학교 항공우주기계공학부 부교수. 관심분야는 강인제어 및 추정이론, 밸런싱 모바일 로봇, 초정밀로봇, 휴머노이드, 비행로봇.